

Evaluation einer automatisierten Bildanalysemethode computertomographischer  
Kalottenbilder zur geschlechtsspezifischen Altersbestimmung in der Rechtsmedizin

Inauguraldissertation  
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin  
des Fachbereichs Medizin  
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von Falk Schumacher  
aus Köln

Gießen 2014

Aus der Klinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie  
des Universitätsklinikums der Justus-Liebig-Universität Gießen

Leiterin: Prof. Dr. med. Gabriele A. Krombach

Gutachter: Prof. Dr. Gabriele A. Krombach

Gutachter: Prof. Dr. Dr. R. Dettmeyer

Tag der Disputation: 31.05.2016

Meinen Eltern

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1	Vorhandene Methoden der Altersbestimmung und deren Schwierigkeiten .....	2
1.2	Vorhandene Methoden der Geschlechtsbestimmung und deren Schwierigkeiten 5	
1.3	Anatomie des Schädels .....	8
1.4	Anatomische Besonderheiten der Schädelkalotte.....	10
1.5	Nichtinvasive radiologische Untersuchung an der „Gießener Sammlung radiologischer Schädelaufnahmen“ .....	13
1.6	Untersuchungen zur Dickenmessung von Schädelkalotten.....	15
1.7	Zielsetzung der Arbeit .....	16
2.	Material und Methoden.....	18
2.1	Datenherkunft .....	18
2.2	Untersuchungskollektiv .....	18
2.3	Radiologische Untersuchungen mit dem eXplore Locus Ultra Computer Tomographen.....	19
2.4	Datenaktualisierung und Migration .....	21
2.5	Datenvorbereitung zur automatischen Bildanalyse .....	22
2.6	Beschreibung der Software.....	25
2.7	Statistische Auswertung .....	32
3.	Ergebnisse .....	36
3.1	Altersverteilung der Kalotten .....	36
3.2	Korrelationsdiagramme der von dem Computerprogramm gemessenen Parameter in Abhängigkeit zum Alter der Verstorbenen .....	38
3.2.1	Mittelwert der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter .....	39
3.2.2	Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter .....	44
3.2.3	Relative (prozentuale) Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter.....	49
3.2.4	Mittelwert der Gesamtsumme der HE pro Kalottenhälfte .....	51
3.2.5	Standardabweichung der Gesamtsumme der HE pro Kalottenhälfte .....	56

3.2.6	Mittelwert des Mittelwertes der HE pro Kalottenhälfte .....	61
3.2.7	Standardabweichung des Mittelwertes der HE pro Kalottenhälfte .....	66
3.2.8	Mittelwert der Standardabweichung der HE pro Kalottenhälfte.....	71
3.2.9	Standardabweichung der Standardabweichung der HE pro Kalottenhälfte 76	
3.3	Korrelationsuntersuchung der verschiedenen Funktionen .....	81
3.3.1	Weibliche und männliche Kalotten .....	81
3.4	Histogramme zur Dickenverteilung, Beispiele.....	83
3.4.1	Histogramme der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe < 20 Jahre, frontale Kalottenhälften.....	84
3.4.2	Histogramme der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe < 20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	85
3.4.3	Histogramme der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe , ≥ 20 Jahre, frontale Kalottenhälften.....	86
3.4.4	Histogramme der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe ≥ 20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	87
3.4.5	Histogramme der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe < 20 Jahre, frontale Kalottenhälften.....	88
3.4.6	Histogramme der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe < 20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	89
3.4.7	Histogramme der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe ≥ 20 Jahre, frontale Kalottenhälften.....	90
3.4.8	Histogramme der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe ≥ 20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	91
4.	Diskussion.....	93
4.1	Diskussion der Messmethode .....	93
4.2	Diskussion der eigenen Ergebnisse .....	96
4.2.1	Altersverteilung der Kalotten .....	96
4.2.2	Mittelwert der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter .....	97
4.2.3	Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter .....	97
4.2.4	Relative (prozentuale) Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter.....	98
4.2.5	Mittelwert der Gesamtsumme der HE pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter .....	98
4.2.10	Standardabweichung der Standardabweichung der HE pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter.....	100

4.3	Einordnung der eigenen Ergebnisse in die vorhandene Literatur zur Altersbestimmung in der Rechtsmedizin.....	100
4.4	Schlussfolgerung und Ausblick .....	103
5.	Zusammenfassung.....	105
6.	Summary .....	107
7.	Abkürzungsverzeichnis.....	109
8.	Abbildungsverzeichnis.....	110
9.	Tabellenverzeichnis .....	118
10.	Literaturverzeichnis.....	119
11.	Publikationsverzeichnis.....	124
12.	Ehrenwörtliche Erklärung .....	125
13.	Danksagung .....	126

## 1. Einleitung

Bei der körperlichen Untersuchung im klinischen Alltag wird dem Untersucher die Variation des menschlichen Schädels oft schon visuell und palpatorisch am Beispiel der verschiedenen Patienten deutlich. Bei genauerer Betrachtung der knöchernen Strukturen an anatomischen Präparaten lassen sich die Normvarianten des Schädels noch genauer erkennen und beispielsweise geschlechtsspezifisch beschreiben (Schiwy-Bochat 2001). Mithilfe verschiedener radiologischer Untersuchungsmethoden kann eine subjektive Beschreibung und Vermessung aller Schichten des menschlichen Schädels durchgeführt werden. Die dreidimensionale Darstellung des knöchernen Anteils des Schädels im CT bietet hierzu bereits Möglichkeiten für verschiedene Bereiche der Medizin.

So bietet die Individualität des menschlichen Schädels insbesondere für die Rechtsmedizin und die forensische Anthropologie besondere Möglichkeiten zur Identifikation von menschlichen Überresten. Die Schädelkalotte ist eine der knöchernen Strukturen des Skeletts, welche sowohl langjährigen Verwesungsprozessen als auch chemischen oder thermischen Noxen gut standhalten kann. Wenn ein Körper durch eben solche Noxen unkenntlich gemacht wurde oder nur noch in skelettierter Form vorliegt, kann durch direkte Untersuchung der knöchernen Strukturen eine Alters- oder Geschlechtsdiagnose gestellt werden (Verhoff und Kreutz 2005). Darüber hinaus wird forensische Altersdiagnostik am Lebenden auch anhand von radiologischen Bildern knöcherner Strukturen gestellt (Dettmeyer et al. 2011). Das Lebensalter ist also nicht nur bei historischen Funden von Interesse, um beispielsweise eine Bevölkerungsdemographie zu erstellen, sondern kann beim Lebenden unter anderem einen wichtigen Aspekt bei der Beantwortung von einwanderungspolitischen oder rentenrechtlichen Fragen bieten (Kreutz und Verhoff 2002). Bei der Altersbestimmung zur Feststellung der Strafmündigkeit Jugendlicher, der Handlungsfähigkeit von Asylbewerbern oder des Rentenalters wird es aus verschiedenen Gründen nötig, eine sehr genaue Altersbestimmung am Körper treffen zu können, auch wenn keine anderen Informationen zum Alter vorliegen. Die Veranlassung verschiedener Methoden zur Altersbestimmung beim Lebenden wirft natürlich auch neue arztethische Fragen auf, da hier Untersuchungen wie Röntgenaufnahmen ohne medizinische Indikation durchgeführt werden müssen (Kaatsch 2001). In der Re-

gel wird für die rechtmedizinische Begutachtung allerdings auf CT-Daten oder Röntgenbilder, die therapeutisch begründet waren, zurückgegriffen (Dettmeyer et al. 2011).

In der Vorliegenden Arbeit sollen die Möglichkeiten, der radiologischen Bildgebung dazu genutzt werden, die individuellen Unterschiede der Schädelkalotte objektiv zu untersuchen, um daraus eventuell neue Möglichkeiten zur Identifikation von unbekannten Personen oder menschlichen Überresten für die Rechtsmedizin ableiten zu können. Zur radiologischen Untersuchung wurde eine neue softwaregestützte Methode entwickelt und deren Möglichkeiten evaluiert. Zunächst soll ein Überblick über die bereits vorhandenen Methoden der Alters- und Geschlechtsbestimmung am Skelett und den damit verbundenen Schwierigkeiten gegeben werden.

### **1.1 Vorhandene Methoden der Altersbestimmung und deren Schwierigkeiten**

Bei der Bestimmung des Alters ist zu berücksichtigen, dass es eine starke Differenz zwischen dem bestimmbar chronologischen und dem bestimmbar biologischen Alter geben kann. Das chronologische Alter ergibt sich aus den Lebensjahren seit Geburt, welche numerisch genau festzuhalten sind. Das biologische Alter hingegen ergibt sich aus verschiedenen zu beobachtenden Faktoren, wie geistiger und körperliche Leistungsfähigkeit, organischer Gesundheit und dem Status degenerativer Veränderungen des Körpers (Kreutz und Verhoff 2002).

Durch die morphologische Beurteilung des Skeletts lässt sich lediglich das biologische Alter bestimmen, wobei die Schlussfolgerung auf das chronologische Alter zu große Fehler beinhalten würde. Je nachdem, ob ein kindlicher oder ein ausgewachsener Körper untersucht wird, ergeben sich erhebliche Unterschiede der Methoden zur Altersbestimmung (Rösing et al. 2005).

Bei Nichterwachsenen steht die Beurteilung der Zahnentwicklung im Vordergrund. Die „Methode der Wahl“ ist hier die Mineralisation der Zähne. Auch der alveoläre Durchbruch wurde als Methode definiert, jedoch wird dieser wegen seiner hohen Variabilität kontrovers diskutiert (Rösing et al. 2005). Eine wichtige Methode bei Jugendlichen ist die Beurteilung der Entwicklung der Epiphysenfugen. So wurde das maximale und minimale Alter des Verschlusses der Epiphysenfugen in verschiedenen Körperregionen ermittelt. Die hieraus entstandene Tabelle ermöglicht eine vom Geschlecht abhängige Altersbestimmung. Die aus Tabelle 1 ersichtlichen Zahlenwerte geben die Altersspanne



in Jahren wieder, in der ein vollständiger Verschluss der beschriebenen Epiphysenfugen frühestens und spätestens beobachtet wird. (Dettmeyer et al. 2011)

Epiphysenfugen	Altersspanne ♀	Altersspanne ♂
Distaler Humerus, proximaler Radius und proximale Ulna	14-17	14-18
Acetabulum	15-18	15-18
Distale Tibia und Distale Fibula	15-18	17-19
Distales Femur, proximale Tibia, proximale Fibula	15-19	17-20
Proximales Femur	15-19	18-21
Calcaneus, Phalangen untere Extremitäten	15-20	15-20
Distale Ulna und distaler Radius	16-19	17-20
Laterale Scapula	16-22	16-22
Phalangen obere Extremitäten	16-20	16-20
Tuber ischiadicum	17-20	21-24
Proximaler Humerus	18-22	20-25
Mediale Scapula	19-21	20-24
Christa iliaca	21-24	21-24
Mediale Clavicula	21-23	22-24

**Tabelle 1: Altersspannen des vollständigen Verschlusses der Epiphysenfugen in Jahren, nach Geschlechtern getrennt, ansatzweise chronologisch geordnet (nach Dettmeyer et al. 2011), mit freundlicher Genehmigung des Verlags: Springer, Heidelberg**

Als weitere Methode steht die sonographische Untersuchung der Knorpeldicke am Femurkopf zur Verfügung, welche im Gegensatz zur Röntgenaufnahme als weniger genau beurteilt wird, allerdings den Vorteil fehlender Strahlenexposition mit sich bringt (Galonska 2001). Saturnus, Salamat und Kenbach-Wighton bestätigten, dass sich auch anhand der Relation von Höhen- und Breitenwachstum der Symphyse eine Altersdiagnose in den ersten dreißig Lebensjahren stellen lässt (Saturnus et al. 2001). So konnte nach differenzierter röntgenologischer, makroskopischer und histologischer Untersuchung der Symphyse eine Altersbestimmung vorgenommen werden.

Zur Beurteilung des Alters von Erwachsenen spielen auch exogene Faktoren, die zu verschiedenen Erscheinungen der Degeneration oder Abnutzung führen, eine große Rolle. Bei der Vielzahl von Methoden, von der Beurteilung der Zahnabnutzung bis zu histologischen Veränderungen der Knochen, ergibt sich durch die große individuelle Variationsbreite eine schwierige Diagnosestellung (Rösing et al. 2005). Als Standardverfahren im Erwachsenenalter wird der Razemisierungsgrad von Asparaginsäuren im Dentin gesehen. Bei dieser Untersuchungsmethode des chronologischen Alters kann ein Fehler durch subjektive Beurteilung nahezu ausgeschlossen werden. Die von Ritze-

Timme beschriebene Methode beruht auf der Tatsache, dass sich L-Asparaginsäure im menschlichen Gewebe in seine D-Form intravital umwandelt (Ritz-Timme 2001). Dieser als Razemisierung bezeichnete Vorgang bewirkt eine Akkumulation von D-Asparaginsäure in permanenten menschlichen Proteinen. Wegen seines homogenen und stabilen anatomischen und biochemischen Aufbaus stellt das Dentin der Zähne das heutige Standardgewebe zur Untersuchung des Razemisierungsgrades dar. Eine Fehlerquelle dieser Methode ist allerdings die Beeinflussung der Razemisierung von Aminosäuren durch besondere Temperaturbedingungen (Ritz-Timme 1999). Als weitere Möglichkeiten der Altersbestimmung nennt Rösing Methoden der Beurteilung des Oberflächenreliefs der Symphyse oder der Nahtobliteration des Schädels (Rösing et al. 2005). Auch Herrmann weist darauf hin, dass eine zuverlässige Altersdiagnose nur durch die Kombination von möglichst vielen verschiedenen Methoden zu stellen ist, was die Wichtigkeit jeder einzelnen Methode nochmals bestätigt (Herrmann 1990).

Zur forensischen Altersbestimmung am Lebenden sind aus verschiedenen Gründen nur ausgewählte Methoden geeignet. Geserick und Schmeling bestätigten durch ihre Datenerhebung im deutschsprachigen Raum, dass die Röntgenuntersuchung der Hand, der Zahnstatus und die OPTG (Orthopantomographie)<sup>1</sup> die am häufigsten angewendeten Altersbestimmungsmethoden beim Lebenden sind (Geserick und Schmeling 2001).

---

<sup>1</sup>Die Orthopantomographie, auch als Panoramaschichtaufnahme bezeichnet, ist eine Röntgenschichtaufnahme des Kieferbereiches, bei der Röhre und Film horizontal um den fixierten Kopf des zu Untersuchenden rotieren. Hiermit kann eine Panoramaaufnahme des gesamten Kieferbereiches mit relativ geringer Strahlenbelastung durchgeführt werden (Pschyrembel und Bach 2010).

## **1.2 Vorhandene Methoden der Geschlechtsbestimmung und deren Schwierigkeiten**

Die Methoden zur Geschlechtsdiagnose am Skelett lassen sich grob in morphologische Methoden, welche etwas einfacher und schneller durchzuführen sind, und molekular biologische Methoden unterteilen. Letztere sind in der Durchführung sicherlich aufwendiger, haben allerdings auch eine höhere Treffsicherheit (Rösing et al. 2005).

Die morphologische Bestimmung des Geschlechts ist bei Kindern vor der Pubertät mit einer weniger guten Treffsicherheit als beim Erwachsenen zu stellen, da die geschlechtsspezifischen Merkmale zu dem Zeitpunkt noch unzureichend ausgebildet sind (Dettmeyer et al. 2011). Aus diesem Grunde wird die Geschlechtsdiagnose beim Kind häufiger über eine molekularbiologische Methode getroffen (Rösing et al. 2005). Obwohl auch der kindliche Schädel geschlechtlich sehr schwierig zu differenzieren ist, zeigte Graw, dass eine genaue Beurteilung des Verlaufes des Meatus acusticus internus sehr wohl eine Geschlechtsbestimmung im Kindesalter zulässt (Graw 2001).

Beim Erwachsenen hingegen tragen das knöcherne Becken und der knöcherne Schädel viele sexualdimorphe Merkmale, die eine morphologische Geschlechtsbestimmung zulassen (Dettmeyer et al. 2011). Als wichtige geschlechtsdimorphe Merkmale beschreibt Dettmeyer den subpubischen Winkel, welcher bei der Frau stumpfer als beim Mann ist, die Beckeneingangskontur, welche bei der Frau eher elliptisch und beim Mann eher herzförmig erscheint, und das Foramen obturatorium, welches bei der Frau eher dreieckig und beim Mann eher ovoid ist. Auch von Rösing (Rösing et al. 2005) wird den Geschlechtsmerkmalen am Becken wegen der Nähe zur Reproduktionsfunktion ein höheres Gewicht zugesprochen. Da die oben angegebenen morphologischen Methoden oft als zu subjektiv bezeichnet wurden, sind morphometrische Methoden entwickelt worden (Dettmeyer et al. 2011). Eine wichtige Methode für die weitere Objektivierung der Geschlechtsdiagnose wurde von Sjøvold beschrieben. Bei der beschriebenen Diskriminanzanalyse wurden die zu untersuchenden Methoden zur Geschlechtsdiagnose am Becken auf verschiedene Populationen von Menschen bekannten Geschlechts bezogen. So kann eine Aussage darüber getroffen werden, wie aussagekräftig ein Merkmal zur Geschlechtsbestimmung allgemein ist (Sjøvold 1988). Die unterschiedliche Größe des gesamten Schädels und der Stirnhöhlen (Rämisch und Herrmann) sowie unterschiedlich kräftig markierte Muskelansätze sind wichtige Differenzierungsmerkmale zwischen

Mann und Frau (Sjøvold 1988). Doch auch am Schädel ist die Ausprägung der knöchernen Strukturen stark von körperlicher Aktivität und Beanspruchung abhängig. So macht Dettmeyer deutlich, dass bei einer Geschlechtsdiagnose das Hintergrundwissen zur Population den Verlauf der Bestimmung fundamental verändern kann (Dettmeyer et al. 2011). Als wichtige Beispiele für geschlechtsspezifische Schädelmerkmale sind die Glabella, der Arcus superciliaris, das Os zygomaticus und die Crista supramastoidea zu nennen (Schiwy-Bochat 2001). Schiwy Bochat hat in seiner Arbeit eine Geschlechtsbestimmung an 12 verschiedenen Merkmalen des Schädels beschrieben, welche eine sehr genaue morphognostische Diagnose zulässt.

Merkmal	a	b	hyperfeminin (-2)	feminin (-1)	indifferent (0)	maskulin (1)	hypermaskulin (2)
Glabella	3	2	sehr schwach	leicht betont	mittel	betont	sehr stark
Processus mastoideus	3	2	sehr klein	klein	mittel	groß	sehr groß
Relief des Planum nuchale	3	1	fehlend	schwach	mittel	stark	sehr stark
Processus zygomaticus	3	0	niedrig, dünn	massig	mittel	hoch	kräftig
Arcus superciliaris	2	1	sehr schwach	leicht betont	mittel	betont	sehr stark
Tubera frontalia et parietalia	2	0	betont	mäßig betont	mittel	schwach	fehlend
Protuberantia occipitalis externa	2	1	sehr schwach	schwach	mittel	stark	sehr stark
Os zygomaticum	2	1	sehr niedrig, glatt	niedrig, glatt	mittelhoch, unregelmäßige Oberfläche	hoch, unregelmäßige Oberfläche	sehr hoch, unregelmäßige Oberfläche
Crista supramastoidea	2	1	sehr schwach	schwach	mittel	stark	sehr stark
Margo supraorbitalis	1	0	sehr scharf	scharf	mittel	leicht abgerundet	stark abgerundet
Forma orbitae	1	0	rund	rund	mittel	leicht viereckig	viereckig
Inclinatio frontale	1	1	vertikal	fast vertikal	wenig geneigt	leicht fliehend	stark fliehend

Summe:

**a** **25**

Summe der Produkte:

**a × b** **24**

Ergebnis:

$\frac{a \times b}{a}$  **0,96**

Geschlecht **m**

**Tabelle 2: Geschlechtsdifferente Merkmale am Schädel, sortiert nach Gewichtung. Die Beurteilungsergebnisse bezüglich der Merkmale eines Schädels sind beispielhaft in Spalte „b“ eingetragen (nach Schiwy-Bochat 2001), mit freundlicher Genehmigung des Verlags: Schmidt-Römhild, Lübeck**

Tabelle 2 zeigt die von ihm eingesetzten Merkmale. Jedem Merkmal des Schädels kann je nach Ausprägung eine Zahl von -2 für hyperfeminin bis 2 für hypermaskulin zugeordnet werden. Diese Zahlen werden dann je nach Aussagekraft mit einem Faktor (Spalte a) multipliziert. Nach dieser Einordnung werden alle Produkte addiert und durch die Summe der Faktoren dividiert:

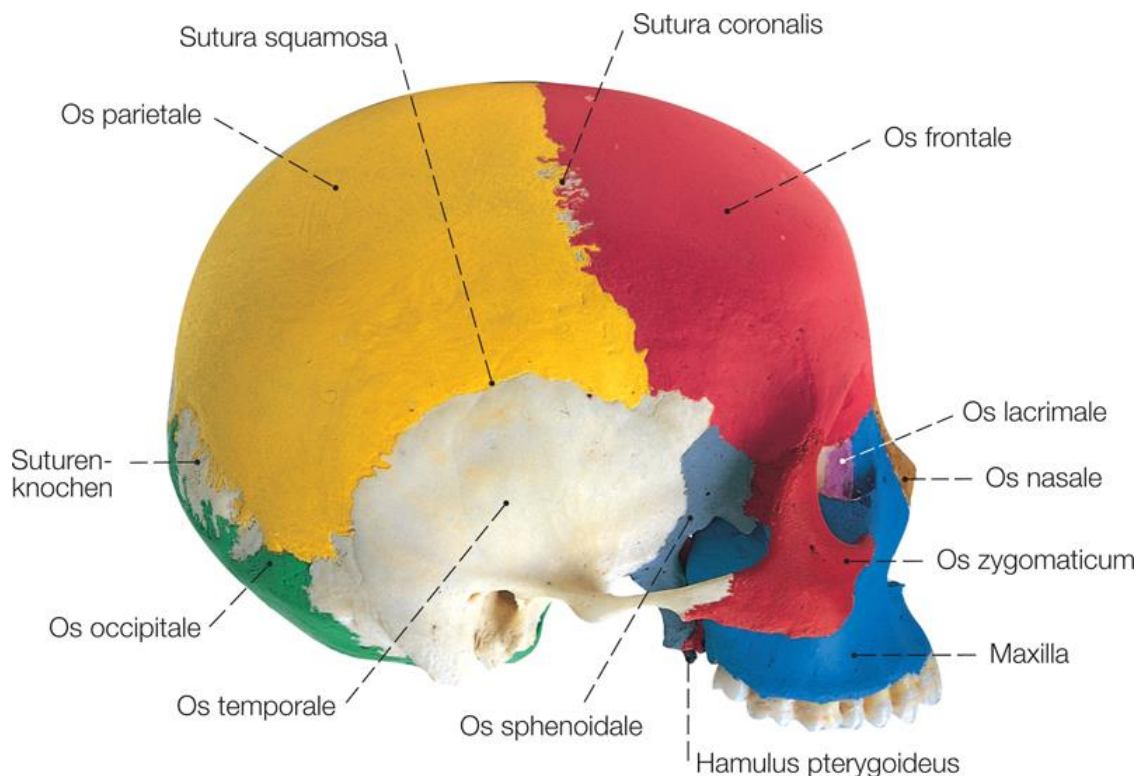
$$\frac{a \times b}{a}$$

Ein negatives Ergebnis deutet eher auf eine Zuordnung zum weiblichen Geschlecht hin und ein positives Ergebnis eher auf die Zuordnung zum männlichen Geschlecht. Auch die Darstellungen von Dettmeyer und Verhoff zeigen eine Einteilung der Merkmale am Schädel in hyperfeminin über indifferent bis hypermaskulin (Dettmeyer et al. 2011).

Leopold beschäftigte sich ebenfalls mit der Geschlechtsbestimmung an menschlichen Schädeln. Nach seinen Ergebnissen ist der große horizontale Schädelumfang bei der erwachsenen Frau im Mittel 51 cm und beim erwachsenen Mann 53 cm. Auch zur Orbitahöhe und -breite veröffentlichte Leopold statistisch signifikante Unterschiede bei Mann und Frau. Ein weiteres untersuchtes Maß war das Gewicht der männlichen bzw. weiblichen Schädel. Für die männlichen Schädel fand er Werte zwischen 190 und 445 g und für die weiblichen Schädel fand er Werte zwischen 175 und 340 g (Leopold 1998).

Die molekularbiologischen Methoden hingegen sind weniger von verschiedenen Einflussgrößen abhängig. So hat Meyer eine Methode beschrieben, in der eine Geschlechtsbestimmung anhand von prähistorischem und aktuellem Knochenmaterial durch die Untersuchung des Proteins Amelogenin möglich ist (Meyer et al. 2000). Dieses wenig erforschte Protein, welches in Zähnen und Knochen vorkommt, lässt eine sehr genaue geschlechtsspezifische Interpretation zu, da es je nachdem, ob das entsprechende Gen auf dem X-Chromosom oder auf dem Y-Chromosom lokalisiert ist, eine Basenfrequenz von unterschiedlicher Länge beinhaltet (Gerstenberger 2002). Einen Nachteil dieser Methode stellen der höhere apparative Aufwand und längere Wartezeiten, bis der Befund vorliegt, dar. (Rösing et al. 2005).

### 1.3 Anatomie des Schädels



**Abbildung 1: Knochen des Schädels von der Seite (Benninghoff, Drenckhahn Anatomie, Band 1, 17. Auflage 2008 © Elsevier GmbH, Urban & Fischer, München), mit freundlicher Genehmigung des Verlags: Elsevier GmbH, Urban & Fischer, München**

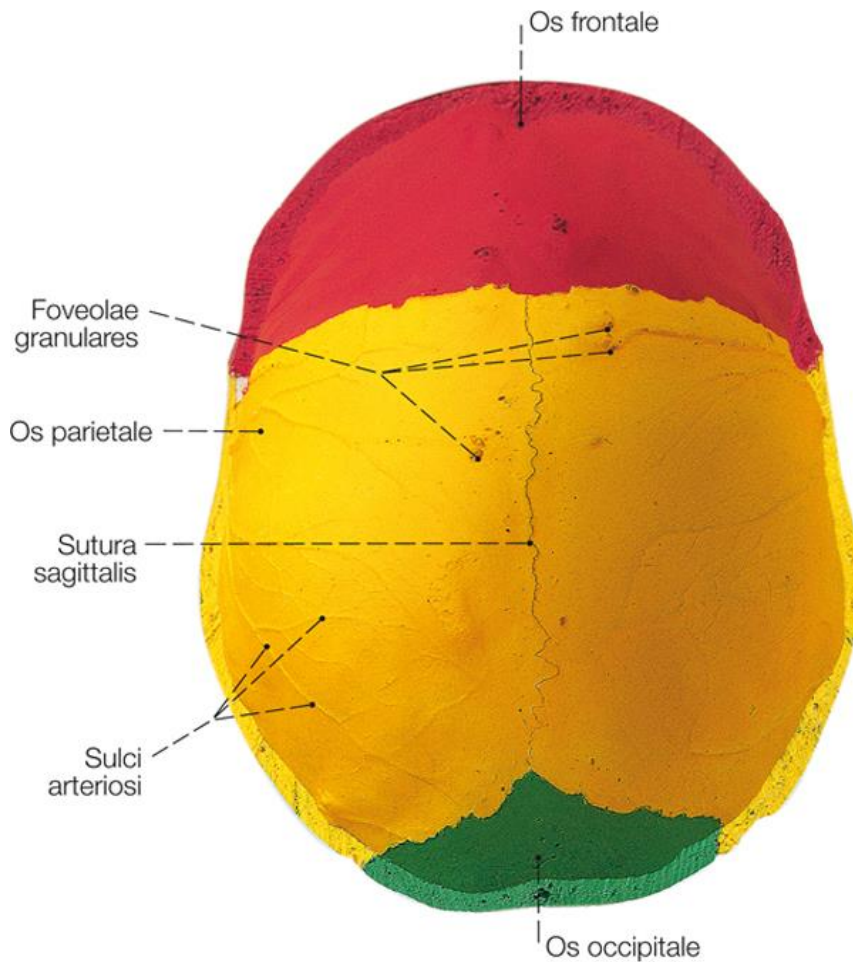
Am menschlichen Schädel werden grundsätzlich die beiden Bereiche, Neurokranium (Gehirnschädel) und Viscerocranium (Gesichtsschädel) unterschieden. Das Neurokranium setzt sich zusammen aus der Kalotte (Schädeldach) und der Basis cranii (Schädelbasis) und dient als geschlossene Schutzhülle für das Gehirn, wobei auch Mittelohr und Labyrinth vom Neurokranium umschlossen werden. Das Viscerocranium ist der knöcherne Anteil des Gesichts, welchem die Augenhöhlen, die Nasenhöhlen einschließlich der Nasennebenhöhlen und die Mundhöhle zuzuordnen sind (Moll und Moll 2000).

Anatomisch genauer setzt sich das Viscerocranium aus den folgenden knöchernen Anteilen zusammen, wobei die meisten paarig angelegt sind (Abbildung 1): Os ethmoidale (Siebbein), Ossa lacrimalia (Tränenbeine), Ossa nasalia (Nasenbein), Vomer (Pflugscharbein), Conchae nasales inferiores (untere Nasenmuscheln), Ossa palatina (Gaumenbeine), Ossa zygomatica (Jochbeine), Maxilla (Oberkieferknochen) und Mandibula (Unterkieferknochen). Zum Neurokranium gehören: Os frontale (Stirnbein), Ossa parie-

talia (Scheitelbeine), Os occipitale (Hinterhauptsbein), Ossa temporalia (Schläfenbeine) und Os sphenoidale (Keilbein) (Moll und Moll 2000).

Neben anderen durch die Schädelentwicklung bedingten Faktoren hängt die individuelle Form des Schädels auch von den ansetzenden Muskeln und dem Inhalt des Schädels ab. Die Muskeln können durch ihre Funktion bestimmte Veränderungen hervorrufen und das Gehirn kann z. B. durch übermäßiges Wachstum eine Vergrößerung des Neurokraniums bedingen. Diese Abhängigkeiten zwischen der knöchernen Hirnkapsel und dem Gehirn sind allerdings wechselseitig, sodass auch ein vorzeitiger Wachstumsstopp im Neurokranium die Ausbildung des Gehirns stark beeinflussen kann. Darüber hinaus bestehen auch Wechselwirkungen zwischen Neurokranium und Viscerokranium, welche zum Beispiel durch eine Abhängigkeit der Ausbildung von Muskulatur und dem Spannungssystem der harten Hirnhäute innerhalb der Schädelkapsel deutlich werden (Platzer et al. 2003).

## 1.4 Anatomische Besonderheiten der Schädelkalotte



**Abbildung 2: Innenansicht der Knochen des Schädeldachs (Benninghoff, Drenckhahn Anatomie, Band 1, 17. Auflage 2008 © Elsevier GmbH, Urban & Fischer, München), mit freundlicher Genehmigung des Verlags: Elsevier GmbH, Urban & Fischer, München**

Im Folgenden soll genauer auf die Kalotte, die Stirngegend und die hier beteiligten knöchernen Strukturen eingegangen werden. Die am Schädeldach beteiligten Knochen, Ossa parietalia, das Os frontale und das Os occipitale setzen sich aus zwei Schichten kompakter Knochensubstanz zusammen, die sich an der Innenseite und der Außenseite des Schädeldachs befinden. Diese Schichten werden bezeichnet als Lamina interna, welche etwas leichter ist, und als Lamina externa, welche als äußere Knochenschicht einen robusteren Aufbau hat. Zwischen diesen beiden Schichten befindet sich die spongiöse Diploe, welche von vielen miteinander kommunizierenden Venenkanälen durchzogen wird. Diese Venenkanäle sind wiederum mit den inneren und äußeren Schädelvenen verbunden (Benninghoff und Drenckhahn 2008). Im Gegensatz zu der spongiösen Schicht in Röhrenknochen ist die Diploe frei von Fettgewebe und in ihren knöchernen



Anteilen sehr viel kompakter. Außerdem sind die Hohlräume zwischen den Knochenbälkchen am Schädeldach kleiner als die der Röhrenknochen (Lippert 2000). Wie alle anderen Knochen ist auch das Schädeldach von einem äußern und einem inneren Periost umgeben. Das innere Periost stellt hier die derbe Hülle des Gehirns, *Dura mater encephali*, dar.

Das Erscheinungsbild einer isolierten Schädelkalotte ist von den charakteristischen Nähten des Schädeldachs geprägt, welche durch die Verschmelzung der einzelnen Knochen während der Entwicklung zustande kommen. Zwischen den beiden Scheitelbeinen befindet sich die *Sutura sagittalis*, welche frontal auf die *Sutura coronalis* stößt und sich okzipital zur *Sutura lambdoidea* aufteilt. Die Schädelnähte verschließen sich oft erst nach dem vierten Lebensjahrzehnt und in manchen Fällen gar nicht. Es wurde in vorangegangenen Studien bereits deutlich, dass die Verknöcherung der Schädelnähte nicht mit dem Alter korreliert (Obert et al. 2010).

Bei der Geburt sind die einzelnen Knochen des Schädeldachs noch nicht vollständig ausgebildet, gegeneinander verschieblich und nur teilweise miteinander verbunden. Die freien Bereiche zwischen den verschiedenen Knochen des Neugeborenen werden als Fontanellen (*Fonticuli cranii*) bezeichnet. Die Hinterhauptfontanelle (*Fonticulus posterior*) wird von den beiden Scheitelbeinen und dem Hinterhauptbein begrenzt. Die Stirnfontanelle (*Fonticulus anterior*) wird von den noch paarig angelegten Stirnbeinen und den beiden Scheitelbeinen begrenzt und verschleißt sich erst im Laufe des zweiten Lebensjahrs.

Die äußere seitliche Region der Schädelkalotte beim Erwachsenen ist relativ glatt und hauptsächlich von bogenförmigen Linien geprägt, welche als Muskelansätze für den *M. temporalis* (Schläfenmuskel) dienen. Das Innenrelief des menschlichen Schädels ist inhomogener und verändert sich im Laufe eines Lebens, was durch verschiedene Faktoren beeinflusst wird. Viele Strukturen, die bei Betrachtung einer Schädelkalotte von innen auffallen, sind durch Impressionen der angrenzenden Weichteile zu begründen. So sind die Abdrücke der Aa. Meningeae als *Sulci arteriosi* und die Furchen der Venen als *Sulci venosi* zu erkennen. Auch die durch die *Dura mater encephali* begrenzten *Sinus durae matris* lassen sich im Relief des *Sulcus sinus sagittalis superioris* und *Sulcus sinus transversus* erkennen. Eine vom Alter abhängige Besonderheit der Knochenoberfläche an der Innenseite der Kalotte sind die *Foveolae granulares* (Abbildung

2). Durch verwachsene Zotten der Hirnhäute bedingt sind diese unregelmäßigen grubigen Vertiefungen an vielen menschlichen Schädeln nach dem achten Lebensjahr zu erkennen. Wenn auch eher schwach ausgebildet, sind außerdem die *Impressiones digitatae* als Abdrücke der Hirnwindungen (*Gyri*) zu nennen.

Hinsichtlich der Dicke der Schädelwand sind große individuelle Schwankungen zu erkennen (Benninghoff und Drenckhahn 2008). Diese beträgt durchschnittlich etwa 5 mm und kann, ohne dass ein besonders kräftig ausgeprägtes sonstiges Skelett vorliegt, bis zu 10 mm dick sein. Diese großen Unterschiede der Schädeldicke sind allerdings nicht durch besondere mechanische Beanspruchungen des Schädelknochens zu erklären. In Bereichen des Schädels, in denen ein Muskel dem Knochen sofort anliegt, kann die Dicke allerdings auch ein Minimum von 1-2 mm erreichen, was zum Beispiel in der Schläfengegend der Fall ist. Auch die Dicke des Schädels kann sich im Erwachsenenalter ändern. So kommt es einerseits im hohen Alter oft zu einer Verdünnung des Schädelknochens, welche von der Außenseite beginnt und durch atrophische Prozesse zu begründen ist. Andererseits kann es auch zu einer Hypertrophie des Knochens kommen, was bedeutet, dass sich die Diploe verdickt, wobei es zu einer Verdünnung der *Lamina interna* und der *Lamina externa* kommt. Als Durchtrittsstelle durch den Schädel sind auch an der Kalotte die oben schon erwähnten Emissarvenen, welche die Verbindung von Venen innerhalb und außerhalb des Schädels darstellen, zu erkennen. Im Bereich der Kalotte ist hier zum Beispiel das Foramen parietale nahe der *Sutura sagittalis* zu erwähnen.

Die Stirnregion des Schädels ist beim Neugeborenen durch das schnellere Wachstum des Gehirns noch relativ weit nach vorne gewölbt. Diese Vorwölbung bleibt bei der Frau oft stärker erhalten als beim Mann. Eine weitere Variabilität in dieser Schädelregion lässt sich an dem *Arcus superciliaris* (Augenbraunbogen) erkennen, welcher sich oberhalb des Augenhöhlenrandes befindet. Dieser kann je nach ethnischer Abstammung des Menschen verstärkt oder weiter ausgedehnt sein (Benninghoff und Drenckhahn 2008).

### **1.5 Nichtinvasive radiologische Untersuchung an der „Gießener Sammlung radiologischer Schädelaufnahmen“**

Im Jahre 2003 wurde am Universitätsklinikum Gießen der erste experimentelle Flat-Panel Volumen Computer Tomograph (VCT oder synonym auch fpVCT oder fpCT) installiert, welcher im Jahre 2006 durch sein Nachfolgemodell eXplore Locus Ultra (eLU) ersetzt wurde. Beide Geräte wurden von der Firma GE hergestellt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Computer Tomographen hat das eLU, bedingt durch den Flat-Panel Detektor, eine deutlich bessere Bildauflösung. Verglichen mit seinem Vorgängermodell ist mit dem eLU eine noch schnellere Datenaquirierung und bessere Bildqualität gewährleistet. Für genauere technische Details, siehe Kapitel 2.3: „Radiologische Untersuchung mit dem eXplore Locus Ultra“. Der eLU war der erste Kleintierscanner, der die Flat-Panel-Technologie nutzte. Für die Anwendung am lebenden Menschen ist der eLU allerdings nicht zugelassen und aufgrund seiner kleinen Gantry auch nicht einsetzbar. Am Fachbereich Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen wird der eLU zur Forschung an Kleintieren und in ex vivo Präparaten eingesetzt und bildet so eine Forschungsplattform, die von verschiedenen Instituten genutzt wird (Obert 2011).

Eine Untersuchung an ex vivo Präparaten hat gezeigt, dass sich die Flat-Panel Computertomographie zur Bearbeitung von rechtmedizinischen Fragestellungen grundsätzlich eignet (Verhoff et al. 2008). Es wurden forensisch-osteologische Proben und Präparate, die im Rahmen von Obduktionen gewonnen wurden, mithilfe des eLU analysiert. Bei der Untersuchung von Herzen, Kehlköpfen, Schädelkalotten und mazerierten Schädeln konnte gezeigt werden, dass die Beurteilung von knöchernen Verletzungen oder Verkalkungen mit dem eLU besonders gut möglich war. Zur Darstellung von Weichteilen zeigte sich das eLU eher als ungeeignet.

Seit 2007 wird in Zusammenarbeit der Abteilung Neuroradiologie des Universitätsklinikums Gießen und dem Institut für Rechtsmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen eine Datenbank, die eLU Bilder von Schädelkalotten aus dem alltäglichen Sektionsgut des Instituts für Rechtsmedizin enthält, stetig erweitert. Siehe hierzu auch Kapitel 2.1 Datenherkunft.

Es wurden verschiedene Studien durchgeführt, die die Möglichkeiten, die sich aus unterschiedlichen Analysemethoden der eLU-Datensätze von Schädelkalotten ergeben, evaluieren. Hierbei wurde unter anderem das Ziel verfolgt, mit diesen Grundlagen even-

tuelle Möglichkeiten zur Abschätzung des Sterbealters oder zur Bestimmung des Geschlechts unbekannter Toter mithilfe von eLU-Daten zu ermöglichen (Obert 2011).

Unter Verwendung der Datensätze der „Gießener Sammlung radiologischer Schädel-aufnahmen“ wurde in einer Studie eine Methode zur visuellen Beurteilung des Verknöcherungsgrades von Suturen des Schädels anhand der radiologischen Bilder erstellt (Harth et al. 2009a). Mit Orientierung an klassischen Schemata zur Beurteilung der Verknöcherungsstadien von Schädelnähten wurden hier die Suturen anhand der dreidimensionalen Datensätze auf ihren Verknöcherungszustand visuell beurteilt. Mithilfe dieser Untersuchungen konnten sieben Verknöcherungsstadien zur Einteilung des Verknöcherungsgrades definiert werden. Dabei hat sich herausgestellt, dass mit dieser Methode eine Einteilung in die Verknöcherungsstadien, auch von verschiedenen Untersuchern, zuverlässig möglich ist. Des Weiteren wurde der Fragestellung zur Abhängigkeit zwischen dem Alter und dem Verschluss der Schädelnähte sowie zum Einfluss des Geschlechtes auf die Schädelnahtossifikation nachgegangen (Harth et al. 2009b). Die statistische Auswertung der Daten zur Altersschätzung zeigte einen Korrelationskoeffizienten zwischen Alter und Verknöcherungsgrad von 0,70. Mit einem 95%-Konfidenzintervall war die Altersschätzung mit einem Intervall von  $\pm 31,1$  Jahren möglich. Demnach ist mit dieser Methode hinsichtlich einer Altersabschätzung gegenüber vergleichbaren Methoden kein Vorteil zu sehen. Einen Zusammenhang zwischen dem Schädelnahtverschluss und dem Geschlecht konnte nicht festgestellt werden. Durch eine weitere Alterseingrenzung mithilfe von Extremwerten konnte ein Mittelwert für die Spannbreite der Lebensaltereingrenzung von 43,31 Jahren berechnet werden (Harth et al. 2010). Im Rahmen dieser Ergänzung zur Einteilung der Schädelnahtossifikation nach eLU Bildern wurde durch spezielle Untersuchungen in der Studie eine gute Urteilerübereinstimmung festgestellt (Harth 2011).

In einem weiteren Ansatz wurden der oben genannte Datensatz erweitert und die radiologischen Bilder automatisch hinsichtlich des Verknöcherungsgrades der Schädelnähte untersucht (Obert et al. 2010). Hier wurde geprüft, ob die Untersuchung der hochauflösenden eLU Bilder mit einem Software-Algorithmus eine Methode zur Bestimmung des Sterbealters von Menschen darstellen könnte. Die Bilder wurden mithilfe einer neu entwickelten Software in verschiedenen Nahtabschnitten für Männer und Frauen getrennt automatisch analysiert. So konnte durch die Software anhand der einzelnen Schnittbildern des eLU geprüft werden, ob eine geschlossene Suture vorliegt oder nicht.

Die Summe der Bilder, in denen eine geschlossene Suture im Querschnitt einer Kalotte ermittelt wurde, stellte dann den Verknöcherungsgrad der Suture dar. Die Beurteilung der Ergebnisse ergab, dass es keinen linearen Zusammenhang zwischen dem Verknöcherungsgrad der Suturen und dem Alter gibt. Mit einem  $X^2$ -Test konnte diese Aussage bestätigt werden. Darüber hinaus konnten keine spezifischen Zusammenhänge zwischen den untersuchten Parametern und dem Geschlecht der Untersuchten Individuen festgestellt werden.

Ein alternativer Ansatz zur Altersschätzung anhand von hochauflösenden Flat-Panel-Computertomographie-Bildern war die Analyse der Knochendichteveränderungen des menschlichen Schädels bei Männern und Frauen (Schulte-Geers et al. 2011). In der vorliegenden Arbeit wurde die Knochendichte der jeweiligen Schädelkalotten als Quotient aus der Masse und dem Volumen definiert, wobei die Masse und das Volumen auch unabhängig voneinander jeweils für Männer und Frauen untersucht wurden. Das Volumen konnte definiert werden als die Summe der Voxel, die in der Aufnahme dargestellt sind, multipliziert mit der bekannten Kantenlängen eines Voxels in dieser Darstellung. Die Masse eines Voxel wurde in Hounsfield-Einheiten (HE), die proportional zur Röntgenabsorption des untersuchten Gewebes sind, beschrieben. So wurden alle vorliegenden Datensätze mit einer individuell für diese Fragestellung erstellten Software hinsichtlich der jeweiligen Parameter untersucht. Ausgewertet wurden alle Individuen mit abgeschlossenem Schädelwachstum. Dabei zeigte sich für Männer keine lineare Korrelation von Volumen, Masse und Dichte mit dem Alter. Für Frauen hingegen konnte eine schwach negative Korrelation von Volumen und Masse mit dem Alter festgestellt werden. Als stärker negativ zeigte sich die Korrelation zwischen Knochendichte und Alter der Frauen mit einem Korrelationskoeffizienten nach Pearson von -0,62. So wurde ein Abfall der Knochendichte bei Frauen schon ab dem zwanzigsten Lebensjahr festgestellt. Dadurch konnte bei einem Konfidenzintervall von 90% eine Altersabschätzung mit einem Intervall von  $\pm 26$  Jahren getroffen werden.

## **1.6 Untersuchungen zur Dickenmessung von Schädelkalotten**

In einer anderen Studie sollten die Dickenunterschiede einer Kalotte im Querschnitt untersucht werden (Eska 2013). Hier sollten ältere Methoden, die eine Altersbestimmung durch manuelle Dickenbestimmung an den Knochen direkt beinhalteten, weiter objektiviert und mit einer größeren Messgenauigkeit durchgeführt werden. In der vor-

liegenden Studie wurde eine Dickenmessung mithilfe der oben genannten Datensätze des eXplore Locus Ultra durchgeführt. Mit einer speziellen Bildbetrachtungssoftware wurden in drei Messbereichen in der Frontalregion aller Schädelkalotten jeweils 10 Dickenmessungen durchgeführt. In der statistischen Auswertung wurden unter anderem der Mittelwert und die Standardabweichung der jeweiligen Messungen einer Kalotte jeweils auf das Alter bzw. das Geschlecht bezogen. Die geschlechtlich getrennte und in zwei Altersgruppen eingeteilte Betrachtung der Ergebnisse zeigt, dass im Alter von 0-20 Jahren eine durch das Wachstum bedingte Zunahme der Kalottendicke vorliegt, die aber unter anderem durch den kleinen Stichprobenumfang an manuell durchgeführten Einzelmessungen in dieser Altersgruppe keine Alters- oder Geschlechtsbestimmung zulässt. Sowohl bei den Männern als auch bei den Frauen in der Altersgruppe von 21-101 Jahren wird deutlich, dass die Mittelwerte der Kalottendicken eine starke Streuung aufweisen und nicht mit dem Alter korrelieren. Hinsichtlich der Standardabweichungen der Werte ist eine starke Überlagerung im Vergleich der männlichen und weiblichen Kalotten gegeben. Die relative Streuung wurde als Maßstab für die Variabilität der gemessenen Dicken angegeben und zeigte eine erstaunlich starke Ausprägung. Nach genauerer Analyse dieser starken individuellen Variation der Dicke wurde festgestellt, dass sich mit dieser Methode kein Zusammenhang dieser Variation mit dem Alter oder dem Geschlecht der Individuen darstellen lässt.

### **1.7 Zielsetzung der Arbeit**

In der vorliegenden Arbeit sollen neue Methoden zur Auswertung von hochauflösenden Flat-Panel-Computertomographie-Bildern untersucht werden. Die vorhandenen Möglichkeiten, die zur Untersuchung der rekonstruierten Bilder bereits existieren, sollen hier durch neue Vorgehensweisen optimiert und weiter objektiviert werden.

Bei der manuellen Dickenmessung an den radiologischen Bildern (Eska 2013) war die Durchführung der Dickenmessung an sich im Verhältnis zu der Anzahl der Messungen mit einem größeren Zeitaufwand verbunden. Dadurch begründet konnte lediglich die Frontalregion des Schädels untersucht werden. Durch eine angepasste automatische Dickenmessung der Kalotten in möglichst großen Bereichen des Schädeldaches soll in dieser Arbeit die Messung durch eine neu erstellte Software schneller, genauer und möglichst objektivierbar durchgeführt werden. Mit der Software soll eine möglichst

große Anzahl von Messpunkten ermittelt werden, was eine genauere Betrachtung der großen individuellen Inhomogenität der Schädeldicke ermöglicht.

Des Weiteren soll diese automatische Messmethode aber auch auf die Messung der Knochendichte<sup>2</sup> der Schädelkalotte in vielen verschiedenen Punkten angewendet werden. In anderen Arbeiten konnte bereits ein Zusammenhang zwischen der Knochendichte von Frauen mit dem Alter gefunden werden. Hier wurde die Knochendichte der gesamten Schädelkalotte untersucht (Schulte-Geers et al. 2011). Durch eine Messung der Knochendichte in vielen verschiedenen Messpunkten soll auch eine Betrachtung der individuellen Variation der Knochendichte in einer Schädelkalotte weiter untersucht werden. In Bezug auf den praktischen Nutzen dieser Untersuchungen soll eine Beurteilung der Möglichkeiten, die sich aus diesen Methoden zur geschlechtsspezifischen Altersbestimmung an Schädelkalotten ergeben könnten, vorgenommen werden.

---

<sup>2</sup> In der vorliegenden Arbeit wurden die radiologisch bestimmten Hounsfield Einheiten direkt als Parameter zur Messung der Knochendichte interpretiert.

## **2. Material und Methoden**

### **2.1 Datenherkunft**

344 verschiedene Schädelkalotten aus den Jahren 2007, 2008, 2010 und 2011 wurden im Rahmen dieser Arbeit retrospektiv untersucht. Hierzu wurde eine Datenbank, die schon im Rahmen anderer Fragestellungen genutzt wurde, erweitert und modifiziert (Obert et al. 2010; Schulte-Geers et al. 2011; Eska 2013).

Diese Datenbank beinhaltet radiologische Bilder von Schädelkalotten, die in Zusammenarbeit der Abteilung für Neuroradiologie des Universitätsklinikums Gießen und dem Institut für Rechtsmedizin der Justus-Liebig Universität Gießen entstanden sind. Die Schädelkalotten wurden während des alltäglichen Sektionsbetriebs im Institut für Rechtsmedizin den Leichnamen entnommen und gereinigt. In der Abteilung Neuroradiologie wurden diese ohne zeitliche Verzögerung mit einem eXplore Locus Ultra Computer Tomographen, welcher weiter unten noch näher beschrieben wird, untersucht. Die vom eLU hergestellten Schnittbilder sind in einer senkrechten Schnittführung zur Sagittalnaht der entnommenen Schädelkalotten entstanden (Harth 2011). Die Schädelkalotten wurden noch während der jeweiligen Sektion dem Leichnam wieder beigegeben. Dieses Vorgehen wurde von der Ethikkommission in Gießen bewilligt (Obert et al. 2010).

### **2.2 Untersuchungskollektiv**

In die vorliegende Arbeit wurden Schädelkalotten von insgesamt 120 Frauen und 224 Männern europäischer Abstammung eingeschlossen. Aus dem gesicherten Geburtsdatum und Sterbedatum der Verstorbenen konnte das genaue chronologische Alter berechnet werden, welches in dem vorliegenden Untersuchungskollektiv zwischen 3 Monaten bis 100 Jahren lag. Darüber hinaus wurden das Sektionsjahr und die Sektionsnummer der Verstorbenen festgehalten. Weitere Informationen wurden nicht übermittelt.



### 2.3 Radiologische Untersuchungen mit dem eXplore Locus Ultra Computer Tomographen

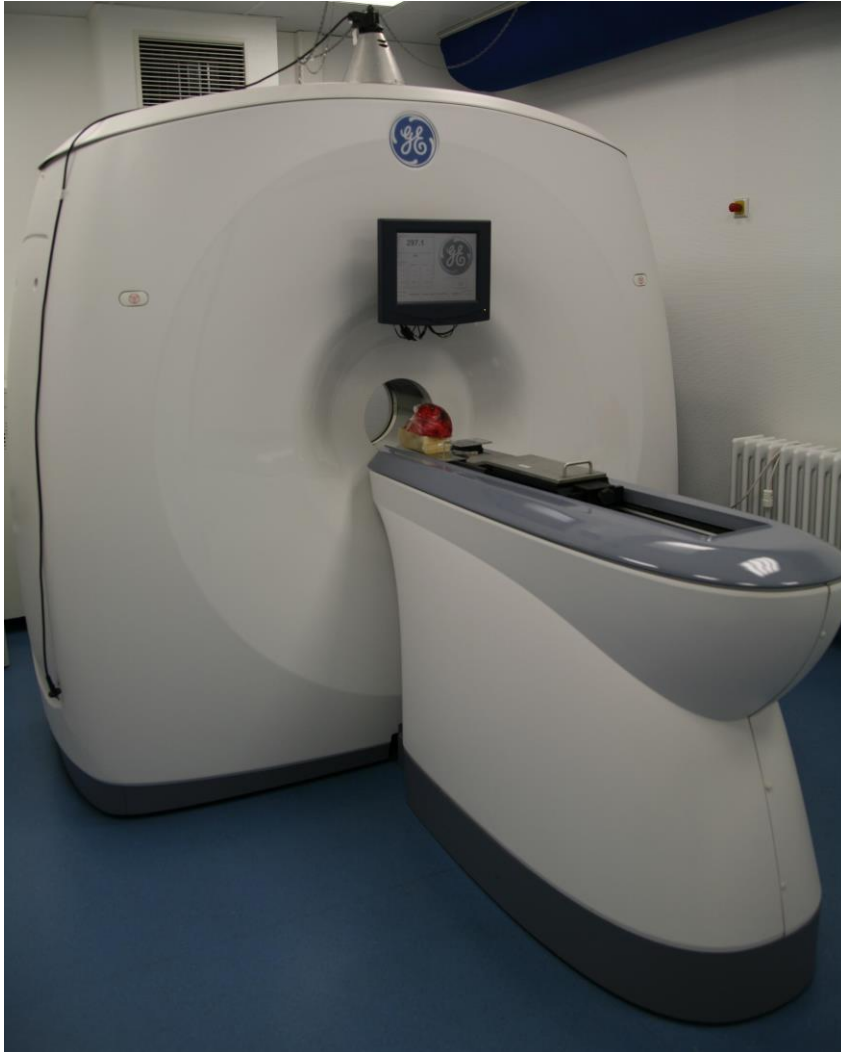


Abbildung 3: Der Tomograph eXplore Locus Ultra – eLU

Die Untersuchungen der Schädelkalotten wurden mit einem Flat-Panel basiertem Computer Tomographen, eXplore Locus Ultra (eLU) durchgeführt, welcher von General Electric (GE Healthcare, London, Ontario, Kanada) entwickelt wurde. Diese radiologische Untersuchung mit dem eLU wurde in anderen Arbeiten bereits beschrieben, (Verhoff et al. 2008; Harth et al. 2009; Obert et al. 2010; Schulte-Geers et al. 2011; Eska 2013)

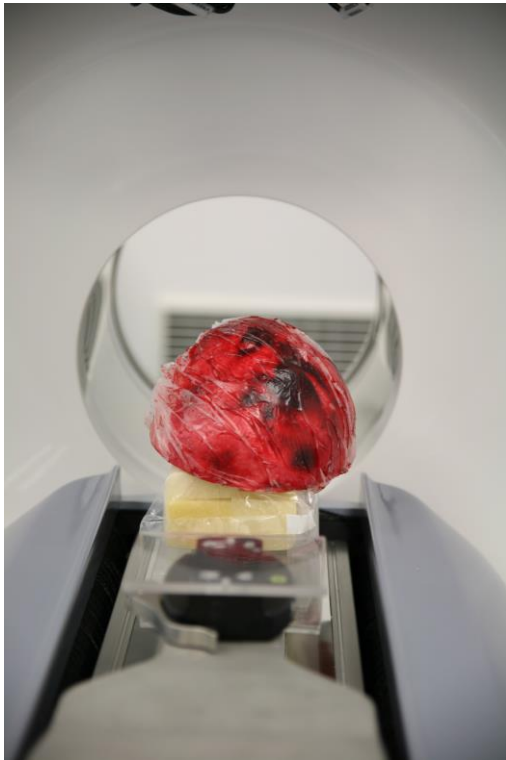
Bei einem Flat-Panel CT wird im Gegensatz zu einem konventionellen Computer Tomographen ein Flachdetektor zur Strahlungserfassung verwendet, welcher bei dem eLU in ein konventionelles CT-Design eingebunden wurde (Harth et al. 2009). Die Beson-

derheit des eLU ist seine hohe Auflösung der Bilder, besonders bei der Untersuchung von Knochenmaterial im radiologischen Hochkontrast. Diese hohe Auflösung von 0,05 mm in jeweils x-, y- und z-Richtung wird dadurch erreicht, dass der Detektor erheblich kleinere Bauelemente zur Strahlerdetektion als ein herkömmlicher Computer Tomograph beinhaltet (Eska 2013). Der Flat-Panel Detektor beinhaltet Cäsiumiodid-Nadeln (CsI), welche auf ein  $1024 \times 1024$  Pixel großes amorphes photosensitives Silizium-Feld aufgedampft wurden. Es werden 1000 Reihen und 680 Zeilen aus dieser Matrix verwendet, um ein Bild mit einer Länge von maximal 10 cm in z-Richtung herzustellen (Obert et al. 2010). In xy-Richtung kann ein Sichtfeld mit den Maßen  $15,9 \times 15,9$  cm<sup>2</sup> dargestellt werden, welches von der z-Richtung unabhängig ist. Zur räumlichen Auflösung werden 2,20 Linienpaare/mm bei einer Modulationstransferfunktion von 10% vom Hersteller angegeben (Obert 2005). In einer Gantry-Rotation werden innerhalb von 16 Sekunden 1000 Einzelprojektionsbilder bei einer Röhrenspannung von 140 kVp und 10 mA angefertigt. Diese Bilder wurden anschließend Mithilfe eines Kegelstrahlrückprojektionsalgorithmus in eine  $512 \times 512 \times 340$  Voxel-Matrix rekonstruiert. Die so entstandenen DICOM-Daten besaßen isotope Voxel mit einer Voxelgröße von (0,295 mm)<sup>3</sup>.

Da alle Schädelkalotten die Länge von 10 cm in der z-Richtung, die maximal von der eLU dargestellt werden kann, überschritten, wurden die Frontalregion und die Okzipitalregion der jeweiligen Schädelkalotten in zwei voneinander getrennten Aufnahmen untersucht. Zur Archivierung wurden die Bilddaten im DICOM-Bildformat auf CDs gespeichert. Aufnahmeeinstellungen und -bedingungen waren für alle Untersuchungen identisch (Eska 2013).

## 2.4 Datenaktualisierung und Migration

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die „Gießener Schädel Sammlung“ durch neu aufgenommene Schädelkalotten aus den Jahren 2010 und 2011 ergänzt, welche nach einer konstanten Positionierungsvorgabe im eLU eingelesen wurden (siehe Abbildung 4). Diese stammen, wie die weiteren in dieser Arbeit verwendeten Daten, aus dem Sektionsbetrieb des Instituts für Rechtsmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen.



**Abbildung 4:** Einlesen einer Schädelkalotte im eLU

Die Daten aus allen erwähnten Jahren wurden auf CDs und externen Festplatten gespeichert. Für die vorliegende Arbeit wurden alle Bilddaten seit 2007 von CDs auf eine Advantage Workstation (AW) übertragen, um hier später die einzelnen Bilder durch visuelle Kontrolle für die automatisierte Bildanalyse vorzubereiten. Bei der Advantage Workstation (AW) handelt es sich um die Bildverarbeitungs- und Bildbetrachtungs-Workstation, der Version 4.1, hergestellt von GE Medical Systems, Buc, Frankreich. Mithilfe dieser Workstation wurden die Daten auf einem Rechner, der mit dem Betriebssystem LINUX betrieben wird (Dual 2,2- GHz-Prozessor mit 4-GB-RAM), visuell analysiert.

Parallel dazu wurden die Bilddaten aller zur Verfügung stehenden Sektionsjahre von externen Festplatten auf einen Bildanalyse-Computer übertragen und in ein Zuordnungssystem integriert. Hierzu wurden alle Bilder in Ordnern mit den dazugehörigen Sektionsnummern und Schädelkalotten-Bezeichnungen zugeordnet. Dies ermöglicht dem Computer den kontrollierten Zugriff auf die Bilder und die dazugehörigen weiteren Informationen, wie Alter und Geschlecht, die zu den Schädelkalotten zur Verfügung stehen.

## **2.5 Datenvorbereitung zur automatischen Bildanalyse**

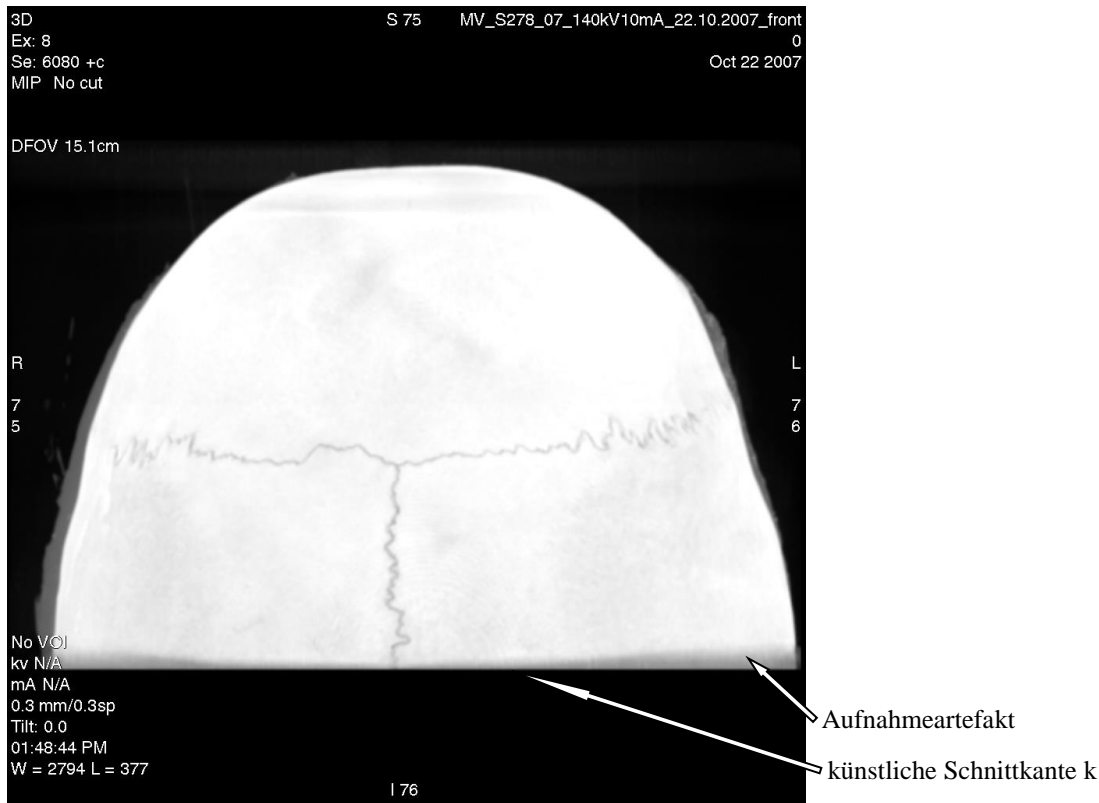
Zur weiteren Vorbereitung der Daten wurden die Bilder, wie oben erwähnt, von den CDs in die Bilddatenbank der Advantage Workstation (AW) übertragen.

Mit der Software, Volume Viewer, Version 3.0.64 (GE Medical Systems, Buc, Frankreich), welche die Darstellung und Vermessung der CT Bilder an der AW ermöglicht, konnten die Aufnahmen dreidimensional dargestellt und im Raum frei bewegt werden. Die Bildbetrachtungsparameter waren bei der Auswertung aller Bilder konstant: Die Darstellungsgröße (englisch, Displayed Field of View (DFOV)) betrug 15,1 cm, die Fenstereinstellung eines Knochenfensters betrug für die Fensterweite (englisch, window width, WW) WW: 2794 Hounsfield Einheiten (HE) und für die Fensterhöhe (englisch, window level, WL) WL: 377 HE.

Alle hier erfassten Informationen und Messdaten wurden von einer Person zusammengetragen und konnten zu dieser Zeit in keinen Zusammenhang mit Alter oder Geschlecht der untersuchten Schädelkalotten gebracht werden. Die Studie ist somit geblin-det durchgeführt worden. In den nächsten Arbeitsschritten musste jedes Bild einer Kalottenhälfte auf eventuelle Bild-Artefakte untersucht werden und der Bild-Bereich festgelegt werden, in dem die Daten von einem automatischen Bildanalyseprogramm anschließend untersucht werden sollten.

Bei der visuellen Untersuchung in der 3D Übersicht, wie in Abbildung 5 zu erkennen, wurden technische Aufnahmefehler, wie eine nicht vollständige Darstellung der Kalottenhälfte, dokumentiert. Darüber hinaus wurden die Kalottenhälften nach ihrer anatomischen Beschaffenheit als frontaler oder okzipitaler Teil der Kalotte identifiziert. Auch andere Artefakte, wie vor der Aufnahme in den Schädel eingebrachte Fremdkörper oder auffällige künstlich herbeigeführte Eröffnungen der Schädeldecken, wurden dokumen-

tiert. Nach diesem Auswahlprozess konnten 676 Kalottenhälften für die Auswertung verwendet werden.



**Abbildung 5: Übersicht einer frontalen Kalottenhälfte an der AW**

In einem weiteren Arbeitsschritt wurden die Schädelbereiche bestimmt, in denen die Bilder in der Frontalebene ausgewertet werden sollten. Um diese Bereich festzulegen wurden die koronalen Schnitte<sup>3</sup> untersucht, um einen optimalen Messbereich festzulegen. Jede Darstellung einer Kalottenhälfte besteht aus 340 Frontalschnitten. Durch Aufnahmeartefakte des eLU im Randbereich der künstlichen Schnittkante k der Kalottenhälfte wurden die ersten Bilder jedes Einlesevorgangs in der Frontalebene in falschen Graustufen rekonstruiert (siehe Abbildung 5). Um spätere Messfehler zu verhindern, wurden 18 Randbilder an der durch die Aufnahme bedingten künstlichen Schnittkante k als nicht auswertbar aus dem zu untersuchenden Bereich der Schädelkalotten herausgenommen.

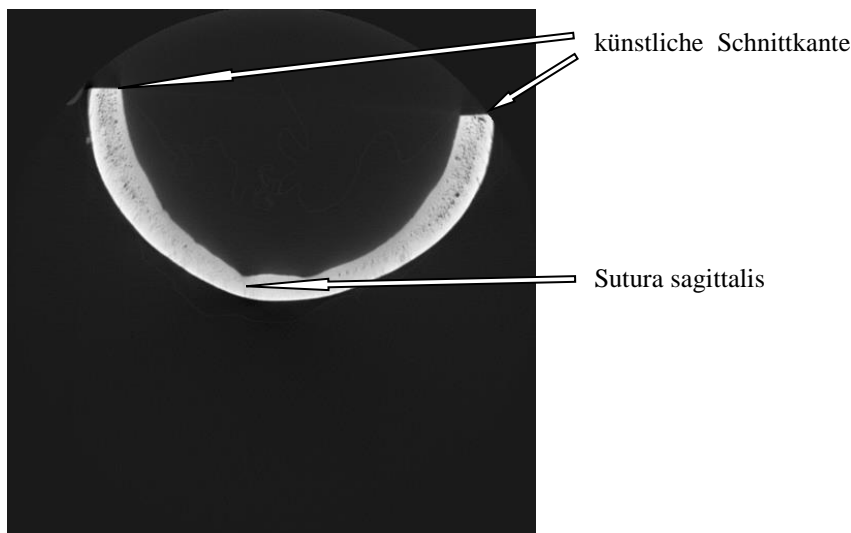
<sup>3</sup> In der Nomenklatur der bildgebenden Schichtaufnahmeverfahren werden die anatomischen Ebenen als „Schnittebenen“ oder kurz „Schnitte“ bezeichnet. Die Schnittebenen senkrecht zur Medianebene werden Frontalschnitte genannt. Diese werden wegen ihrer parallelen Lage zur Sutura coronalis auch als koronale Schnitte bezeichnet (Fleckenstein et al. 2004).

Um durch Messungen der Querschnittsbilder die Kalottendicke ermitteln zu können, muss die Schnittführung durch das Schädeldach näherungsweise  $90^\circ$  zur Schädeloberfläche betragen. Mit steigender Krümmung der Kalottenhälften in Richtung Frontal- bzw. Okzipitalpol weichen die Schnittwinkel der rekonstruierten Bilder von diesem Optimum ab. Um eine falsche Messung dieser Dicken im Computerprogramm zu verhindern, musste der Grenzbereich für die auszuwertenden koronalen Schnitte in frontale bzw. okzipitale Richtung ermittelt werden. Dieser Grenzwerte wurden durch Vergleichen von Frontal- bzw. Sagittalbildern in der Frontal- bzw. Okzipitalregion einiger beispielhafter Schädelkalotten festgelegt. Die zu vergleichenden Bilder in Frontal und Sagittalebene hatten dabei immer einen gemeinsamen Punkt, auf der nach dem Sulcus sinus sagittalis superior orientierten Linie. Die in beiden Ebenen erscheinenden Schnitte durch die Kalotte wurden hinsichtlich ihrer Dicke untersucht. Diese Dickenmessungen wurden manuell mit einem digitalen Lineal an der AW durchgeführt. Nur die Frontalbilder, die einen Punkt auf der schädelhalbierenden Linie geschnitten haben, an dem die gemessene Dicke der Kalotte in Frontal- und Sagittalebene mit einem Fehler von  $<0,1\text{mm}$  identisch ist, sollten mit in die weitere Verarbeitung aufgenommen werden. So wurden alle Bilder auf durch die Schnittführung bedingte potentiell falsch auszuwertende Bereiche untersucht. Es konnte so ein Bereich der Kalotte definiert werden, in dem nach dieser Messmethode nur Frontalschnittbilder in den untersuchten Kalotten enthalten waren, in denen durch die Schnittführung keine falsche automatische Dickenmessung durchgeführt werden konnte.

Nach diesem Auswahlprozess konnte somit die zweite allgemeine Grenze der auszuwertenden Bilder nach dem 100. Bild von der Schnittkante k in Richtung okzipital bzw. frontal gezogen werden. So wurde ein Bereich mit einem Umfang von 82 Bildern in der Frontalebene für die automatische Messung festgelegt. Je nachdem, in welcher Position die Kalottenhälfte in dem vorliegenden Bilddaten dargestellt wurde, konnte der oben genannte Auswahlbereich auf die jeweilige Kalottenhälfte individuell bezogen werden und die auszuwertenden Bildnummerierungen dokumentiert werden.

## 2.6 Beschreibung der Software

Die ausgewählten Frontal- und Okzipital-Schnitte der Schädelkalotten wurden durch ein in der IDL<sup>4</sup> Computersprache für diese Arbeit entwickeltes Programm ausgewertet. Der zu Grunde liegende Algorithmus und das Programm wurde von Herrn Dr. Obert, Abteilung Neuroradiologie, dieses Klinikums entwickelt und implementiert. Grundlage für die automatische Bildauswertung waren die radiologischen Schnittbilder, welche mit dem eLU erzeugt wurden. Für die Messungen war eine gleiche und exakte Lagerung aller Kalotten im eLU eine wichtige und notwendige Voraussetzung. Nur so konnte eine identische und erfolgreiche Behandlung aller Schnittbilder durch den gleichen Algorithmus des Computerprogramms einfach ermöglicht werden. Beispielhaft soll hier an einem repräsentativen Frontalschnitt einer Kalotte die entwickelte Software beschrieben werden. Nach diesem Vorgehen wurden durch das Computerprogramm jeweils 82 Bilder zu jeder der 676 Kalottenhälften untersucht.



**Abbildung 6: Rohdatenschnittbild**

In Abbildung 6 ist ein Rohdatenschnittbild zu sehen. Durch den Aufnahmeprozess bedingt liegt die künstliche Schnittkante der Kalotte im Bild immer oben und die Sutura sagittalis immer unten. Die künstliche Schnittkante ist dabei als die Kante definiert, an der die Kalotte während der Sektion abgesetzt wurde. Wie bereits oben erwähnt, besteht das rekonstruierte Schnittbild der Kalotte aus 512 Vokeln in x- und y- Richtung. Dieser

---

<sup>4</sup> Zur Erstellung der Software wurde folgendes Programm verwendet: IDL®, Version 8.1.0, Execlis Visual Information Solutions, Boulder, Colorado, USA, 2012

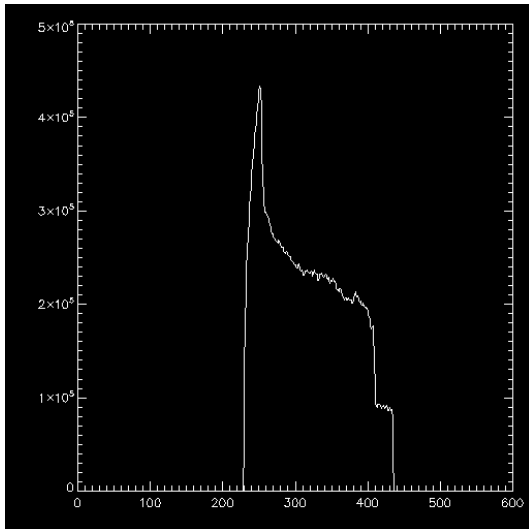
Frontalschnitt zeigt neben der Kalotte aus dem Sektionssaal auch noch im hellgrauen Bereich Teile des Plastikbeutels, in den die Kalotte zu Transportzwecken eingebracht wurde. Da diese Strukturen im Laufe des Untersuchungsvorgangs zu fehlerhaften Messungen führen könnte, wurde eine Trennwert-Segmentierung durchgeführt, welche dazu führt, dass diese Strukturen für die Messungen keine Rolle mehr spielen.



**Abbildung 7: Kalottenschnittbild nach einer Trennwert-Segmentierung**

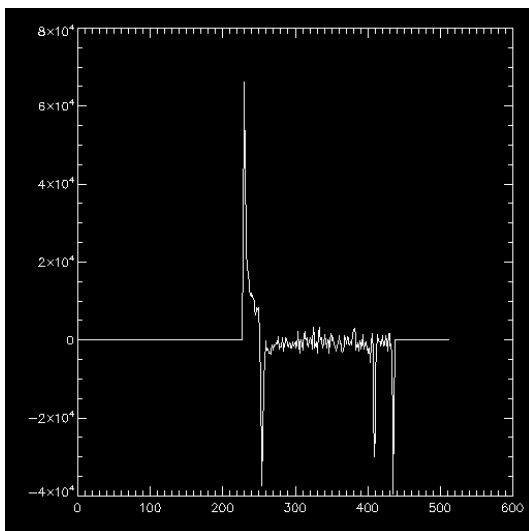
Nach einer Trennwert-Segmentierung von 700 Hounsfield-Einheiten ist ausschließlich die segmentierte Kalotte zu erkennen (Abbildung 7). Die Segmentierung erfolgte nach der Vorschrift, dass alle Voxel zu einem Bild zählen, wenn die HE dieser Voxel größer oder gleich 700 HE ist. Um viele verschiedene Dickenmessungen bzw. Knochendichtemessungen an jedem der 82 Schnittbilder einer Kalotte durchzuführen, sollte eine automatische Messmethode für jedes Schnittbild gleich definiert werden. Dazu wurde der Querschnitt der Kalotte als Halbkreis gesehen. Die Software hat den Mittelpunkt dieses gedachten Kreises ermittelt, um von dort aus fächerförmige Linien zur Messung der Kalottendicke und -dichte zu ziehen. Um diesen Mittelpunkt für jedes Schnittbild individuell zu ermitteln, wurden die Summe der Hounsfield-Einheiten für jede Zeile  $y$  des rekonstruierten Bildes gebildet und die Ergebnisse in einem Koordinatensystem dargestellt. In diesem Beispiel entsprechen die Zeilen  $y$  den Zeilen der Matrix des rekonstruierten Bildes in Abbildung 7, welche von unten nach oben gezählt wurden.





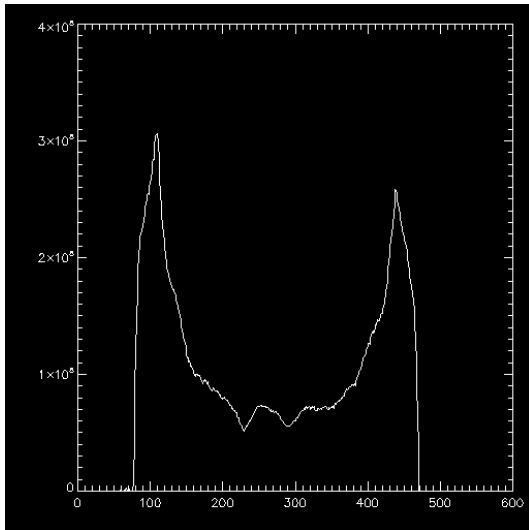
**Abbildung 8: HE Histogramm in y-Richtung**

Die Software sollte für jede Zeile  $y$  die Summe aller HE-Werte des segmentierten Kalottenschnittbildes errechnen und gegen die Zeilennummer aufgetragen (Abbildung 8). In der Grafik ist zu erkennen, dass in den unteren und oberen Zeilen des Schnittbildes keine HE gemessen werden konnten. Im mittleren Bereich zeigt die Kurve einen den gemessenen HE entsprechenden Verlauf, der durch Betrachtung der Abbildung 7 nachzuvollziehen ist.



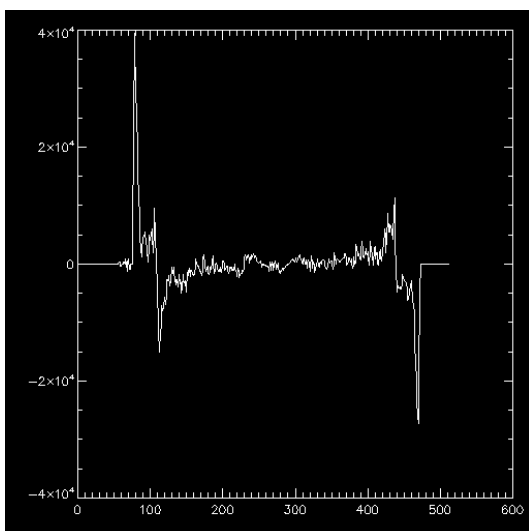
**Abbildung 9: Erste Ableitung der Histogramm-Kurve aus Abbildung 8**

Wie in Abbildung 9 zu erkennen, sollte die Software im Verlauf der Analyse die erste Ableitung der in Abbildung 8 dargestellten Kurve berechnen. Das Maximum der ersten Ableitung stellt hier die tiefste y-Position der Lamina externa im Schnittbild dar und die beiden Scheitelwerte im rechten negativen Bereich des Grafen stellen die y Positionen der künstlichen Schnittkanten im Frontalschnitt dar. Dasselbe Vorgehen wurde auch für die Spalten x der Querschnitte durchgeführt.



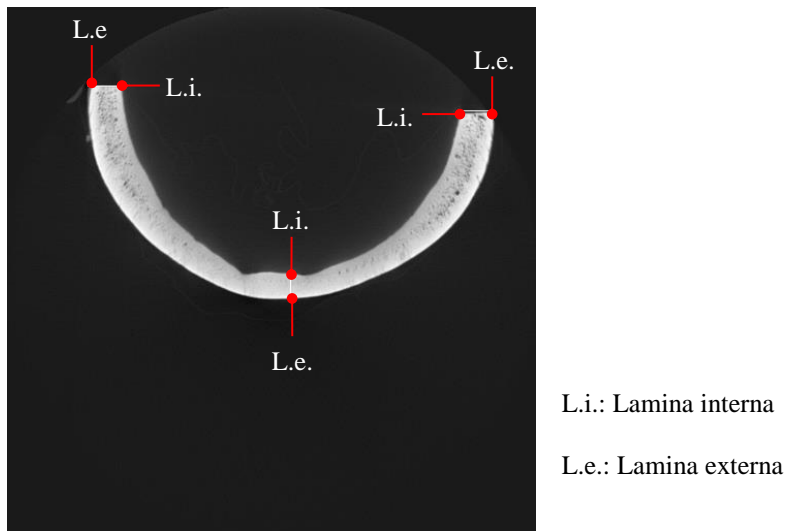
**Abbildung 10: HE Histogramm in x-Richtung**

Wie in Abbildung 10 zu erkennen, wurde hier für jede Spalte x die Summe aller HE-Werte des segmentierten Kalottenschnittbildes berechnet und gegen die Spaltennummer aufgetragen.



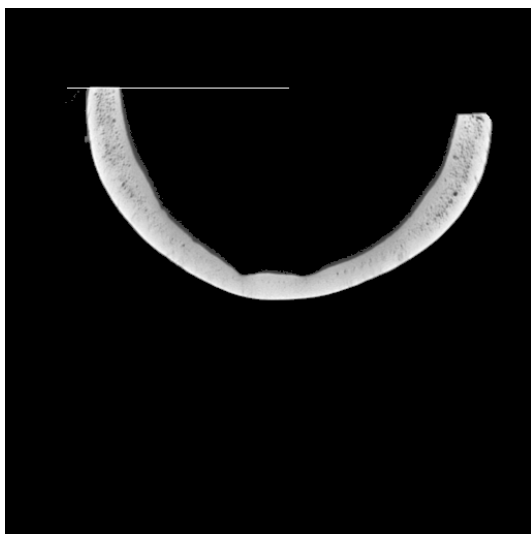
**Abbildung 11: Erste Ableitung der Histogramm-Kurve aus Abbildung 10**

Das Maximum der ersten Ableitung (Abbildung 11) stellt die x-Position der Lamina externe der im Querschnittbild links dargestellten künstlichen Schnittkante der Kalotte dar. Das Minimum im rechten Bereich der ersten Ableitung stellt die x-Position der Lamina externe der im Querschnitt rechts dargestellten künstlichen Schnittkante dar. Durch die so erhaltenen Positionen konnten die Orientierungspunkte für die Kalottenmessung festgelegt werden.



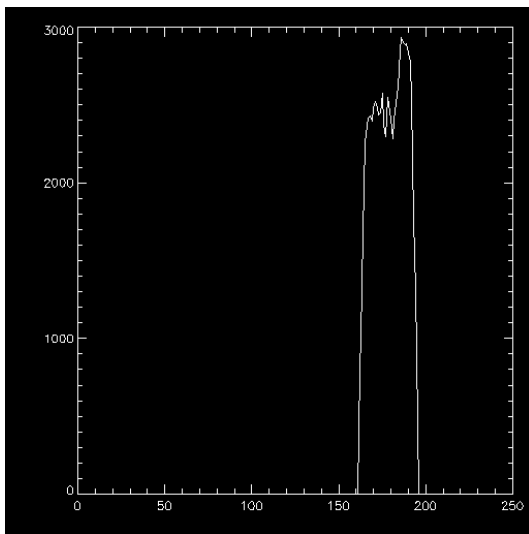
**Abbildung 12: Festlegung der Orientierungspunkte für charakteristische Kalottenpositionen**

Die genauen xy-Koordinaten der Orientierungspunkte können aus den Maxima und Minima der ersten Ableitung der Histogrammkurven, welche in Abbildung 9 und 11 dargestellt sind, erhalten werden. Die Positionen der Orientierungspunkte sind in Abbildung 12 rot gekennzeichnet.



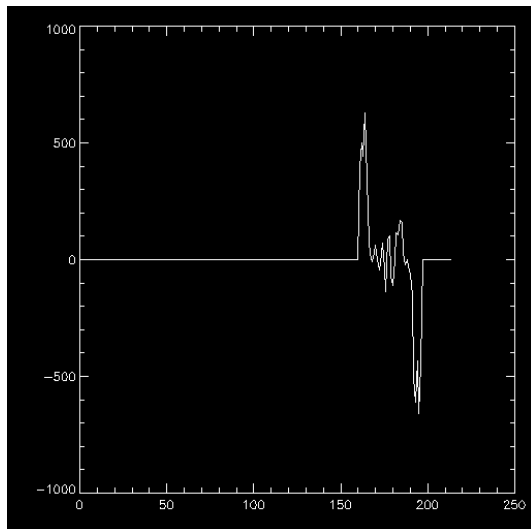
**Abbildung 13: Bestimmung der Dicke und der Knochendichte**

Die Bestimmung der Kalottendicke wurde entlang einer vom Kalottenzentrum aus geschlagenen Linie, welche im Verlauf auch als Liniensegment bezeichnet wird, durchgeführt (Abbildung 13). Das Kalottenzentrum ist dabei definiert als der Mittelpunkt auf der Linie zwischen den inneren Positionen der Lamina interna an der künstlichen Schnittkante, falls diese auf gleicher Höhe in y-Richtung liegen. Liegen die inneren Positionen der Lamina interna an der künstlichen Schnittkante nicht auf gleicher Höhe in y-Richtung, so wird der höhere y-Wert der beiden Lamina interna Positionen gewählt. Entlang der Linie, die von Mittelpunkt m ausgeht, wird die Dicke der Kalotte gemessen.



**Abbildung 14: HE Histogramm entlang der in Abbildung 13 gezeigten Linie**

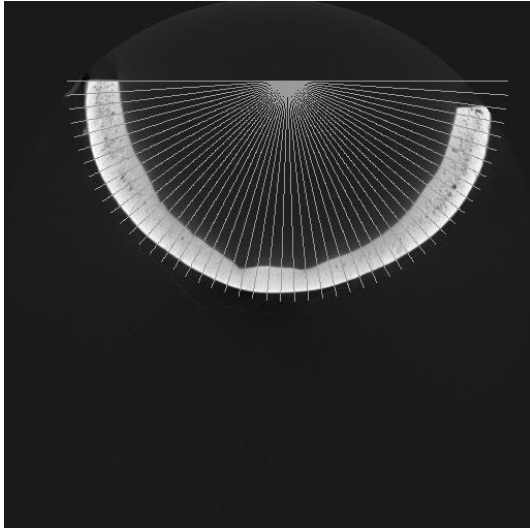
In Abbildung 14 sind die Hounsfield-Einheiten der Voxel, welche von der in Abbildung 13 dargestellten Linie geschnitten wurden, in Abhängigkeit von der Voxelposition auf dieser Linie aufgetragen. Die Zählung der Voxel wurde dabei vom Mittelpunkt nach außen durchgeführt.



**Abbildung 15: Erste Ableitung der Histogramm-Kurve aus Abbildung 14**

Das Maximum der in Abbildung 15 dargestellten ersten Ableitung stellt die Position der Lamina interna dar, in welcher diese von der in Abbildung 13 dargestellten Linie geschnitten wurde. Das Minimum der ersten Ableitung stellt die Position dar, in der die Lamina externa von der Linie getroffen wird. Aus der Differenz zwischen dem Maximum und dem Minimum kann die Dicke der Kalotte in Voxeln berechnet werden. Da die Voxelkantenlänge bekannt ist, kann die Umrechnung in eine Längenangabe, wie zum Beispiel in mm, leicht erfolgen.

Die Messung der Knochendichte in denselben Punkten, in denen auch die Dicke der Kalotte gemessen wurde, erfolgte nach einem ähnlichen Prinzip wie die Dickenmessung. Die Knochendichte in einem Punkt der Kalotte war dabei definiert als die Summe aller Hounsfield-Einheiten der jeweiligen Voxel, welche von der in Abbildung 13 dargestellten Linie geschnitten wurden.



**Abbildung 16:** Darstellung vieler Liniensegmente, die vom Kalotttzenzentrum  $m$  entlang eines Halbkreises geschlagen werden.

Wie in Abbildung 16 dargestellt, wurden diese Untersuchungen für alle 82 Bilder jeder Kalottenhälfte an vielen Liniensegmenten durchgeführt. Die Liniensegmente gehen hierbei alle von dem Mittelpunkt der geschnittenen Kalottenhälfte aus. Die Kalottendicke und -dichte wurden dabei für jedes in Abbildung 16 gezeigte Liniensegment, nach der zuvor beschriebenen Methode, bestimmt. Voraussetzung war dabei, dass die Summe aller Voxel eines Liniensegmentes größer als 0 ist. Ein Test auf diese Bedingung wurde vor der Bestimmung der ersten Ableitung durchgeführt. Dieser Test eliminiert Liniensegmente in der Nähe von Kantenpositionen, die die Kalotte nicht schneiden. Dies hat zur Folge, dass die Anzahl der untersuchten Liniensegmente von Kalotte zu Kalotte geringfügig abweicht, was bei der großen Anzahl von untersuchten Liniensegmenten zu vernachlässigen ist.

Darüber hinaus wurde zu jeder Kalottenhälfte ein Histogramm erstellt, in dem die Verteilung der verschiedenen Dickenausprägungen einer einzelnen Kalottenhälfte zu erkennen ist (siehe Kapitel 3.4: „Histogramme zur Dickenverteilung“).

## **2.7 Statistische Auswertung**

Für jede Kalottenhälfte wurden von der Software durchschnittlich 6176 Liniensegmente bestimmt, in denen jeweils die Dicke und die Knochendichte des Schädeldachs gemessen wurden. Diese Ergebnisse der Einzelmessungen wurden im IDL-Programm getrennt nach Geschlecht und Zuordnung der Kalottenhälfte in frontal oder okzipital aufgenom-

men und weiter verarbeitet. Die Daten wurden so in vier Gruppen dargestellt. Für alle gemessenen Liniensegmente einer Kalotte wurden folgende Daten festgehalten: Dicke des Knochens, die Gesamtsumme der Hounsfield-Einheiten, der Mittelwert der HE und die Standardabweichung der HE. Für jede Kalotte wurden dann der Mittelwert und die Standardabweichung dieser an den einzelnen Liniensegmenten gemessenen Parameter auf alle Liniensegmente einer Kalottenhälfte bezogen ermittelt.

Diese Daten wurden in das Programm Microsoft Excel (Version 2010) importiert und tabellarisch festgehalten. Der Mittelwert und die Standardabweichung der oben genannten Daten, jeweils auf eine Kalottenhälfte bezogen, waren somit nach dem Alter sortiert auszuwerten. Im Verlauf wurden die Kalottenhälften in zwei Gruppen mit der Alterszuordnung,  $<20$  Jahre und  $\geq 20$  Jahre eingeteilt. Folgende Werte wurden für beide Altersgruppen, getrennt nach Geschlecht und anatomischer Zuordnung der Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter dargestellt:

1. Mittelwert der Dicke pro Kalottenhälfte
2. Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte
3. Relative (prozentuale) Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte
4. Mittelwert der Gesamtsumme der HE pro Kalottenhälfte
5. Standardabweichung der Gesamtsumme der HE pro Kalottenhälfte
6. Mittelwert des Mittelwertes der HE pro Kalottenhälfte
7. Standardabweichung des Mittelwertes der HE pro Kalottenhälfte
8. Mittelwert der Standardabweichung der HE pro Kalottenhälfte
9. Standardabweichung der Standardabweichung der HE pro Kalottenhälfte

Zu diesen Parametern wurde jeweils der Pearson Korrelationskoeffizient mit Microsoft Excel (Version 2010) berechnet. Im Folgenden sollen der Mittelwert, die Standardabweichung und der Korrelationskoeffizient statistisch genauer definiert werden.

Der **Mittelwert**, auch Erwartungswert genannt, ist eine Kenngröße aus der deskriptiven Stochastik, welche darüber informiert, in welchem Bereich sich Stichprobenwerte konzentrieren. Das in dieser Arbeit verwendete arithmetische Mittel wird mit  $\bar{x}$  bezeichnet. Die Berechnung erfolgt mit nachstehender Formel, wobei die einzelnen Werte einer Variablen  $x_i$  mit  $i = 1, 2 \dots n$  Messwerten repräsentiert werden.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Hier werden alle Stichprobenwerte addiert und deren Summe durch den Stichprobenumfang  $n$  dividiert. Der Mittelwert wird stets in derselben Maßeinheit wie die Daten der Stichprobe angegeben. Als einem der bekanntesten Lagemaße wird dem Mittelwert oft eine sehr große Bedeutung zugesprochen. Ein Nachteil ist allerdings, dass dieser durch Ausreißer stark beeinflusst werden kann (Weiß 2010).

Auch die **Standardabweichung** hat in der Stochastik eine große Bedeutung und stellt eine Kenngröße der Streuung dar, inwieweit Werte einer Zufallsgröße im Mittel von ihrem Erwartungswert abweichen (Beichelt 2003). Für eine Zufallsvariable  $x$  wird die Standardabweichung als die positive Quadratwurzel aus deren Varianz wie folgt definiert:

$$\sigma = \sqrt{s^2}$$

Die Varianz wird dabei folgendermaßen definiert:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Der **Korrelationskoeffizient**  $r$  nach Pearson ist ein Maß zur Beurteilung eines linearen Zusammenhangs. Dieser wird mit nachstehender Formel definiert:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y}, \text{ wobei } s_x \text{ und } s_y \text{ folgendermaßen zu beschreiben sind:}$$

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{und}$$

$$s_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Der Korrelationskoeffizient ist dimensionslos und kann nur Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Ein positives Vorzeichen deutet dabei auf einen gleichsinnigen Zusammenhang und ein negatives Vorzeichen auf einen gegensinnigen Zusammenhang hin. Je näher  $r$  gegen 0 geht, desto weniger groß ist auch der Zusammenhang. Je näher der Ab-



solutbetrag von  $r$  an 1 liegt, desto größer ist der Zusammenhang. Zur Visualisierung des Zusammenhangs zweier Größen eignet sich die Darstellung in einem zweidimensionalen Koordinatensystem. Die Werte sind hier als eine Punktwolke zu erkennen, durch die eine Regressionsgerade gezogen werden kann. Je näher  $r$  an 0 liegt, desto weiter streut die Punktwolke um die Gerade. Wenn der Betrag von  $r$  gegen 1 strebt, liegen auch die Punkte dementsprechend nahe an der Regressionsgerade (Weiß 2010).

Die Normalverteilung der oben genannten Werte ist eine Voraussetzung für die Berechnung des Korrelationskoeffizienten. Diese wurde mit dem Shapiro-Wilk Test überprüft. Mit dem Online-Rechner auf der Internetseite „SciStatCalc.blogspot.co.uk“ wurden hierzu ein „ $W_{\text{berechnet}}$ “ und ein „ $W_{\text{kritisch}}$ “ ermittelt. Zu den detaillierten Formeln siehe: <http://scistatcalc.blogspot.co.uk/2013/10/shapiro-wilk-test-testing-for-normality.html>.

### 3. Ergebnisse

Im Rahmen dieser Studie wurden an jeder Kalottenhälfte durchschnittlich 6176 Linien-segmente untersucht. Bei den 344<sup>5</sup> Schädelkalotten, wurden insgesamt 4.175.032 Liniensegmente erstellt, in denen jeweils verschiedene Messungen durchgeführt werden konnten.

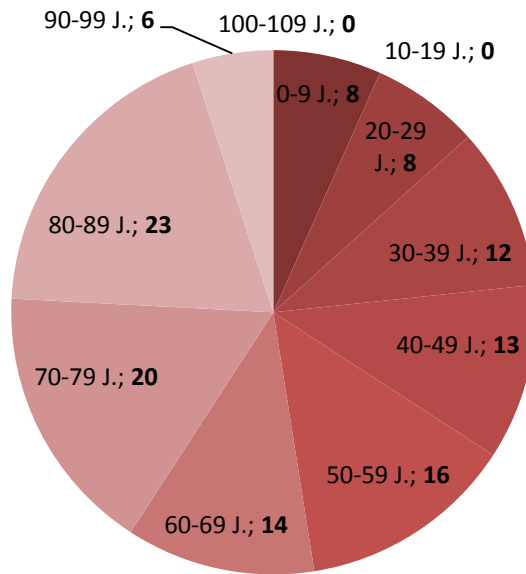
Zur Beschreibung der Ergebnisse soll im ersten Teil die Altersverteilung der untersuchten Schädelkalotten dargestellt werden. Hier wird das Alter der Schädelkalotten mit dem Sterbealter der Personen gleichgesetzt. Es folgt die Beschreibung der verschiedenen untersuchten Kenngrößen in Abhängigkeit zum Alter der Schädelkalotten anhand von Korrelationsdiagrammen. Die Ergebnisse dieser Korrelationsanalysen werden im Verlauf zusammenfassend anhand der Korrelationskoeffizienten dargestellt. Abschließend erfolgt eine exemplarische Darstellung der Histogramme zur Dickenverteilung der einzelnen Kalotten.

#### 3.1 Altersverteilung der Kalotten

Aus dem Sektionsgut des Institutes für Rechtsmedizin der Justus-Liebig Universität Gießen konnten insgesamt 120 weibliche und 224 männliche Kalotten in die Untersuchungen aufgenommen werden. Zur besseren Veranschaulichung der Altersverteilung wurden die Kalotten nach Geschlecht getrennt in Altersgruppen eingeteilt. In Abbildungen 17 und 18 wird die Kalottenanzahl in den einzelnen Altersgruppen grafisch dargestellt.

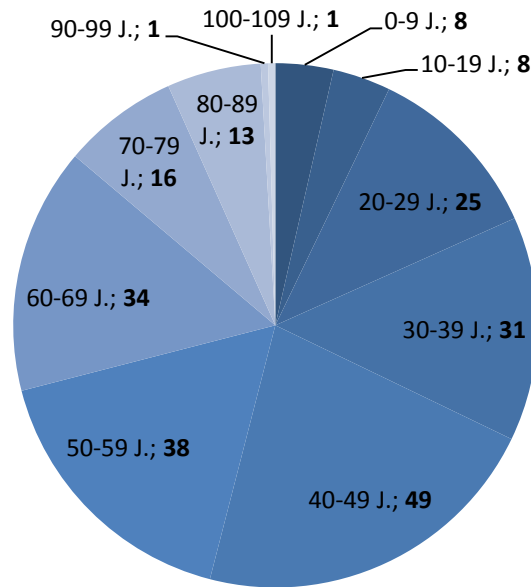
---

<sup>5</sup>Insgesamt wurden von 332 Schädeln beide Kalottenhälften in die Auswertungen integriert. Von den verbleibenden 12 Schädelkalotten konnte jeweils nur eine Kalottenhälfte verwendet werden, weil die dazugehörige andere Kalottenhälfte artifizielle Veränderungen aufwies, welche zu falschen Ergebnissen hätte führen können.



**Abbildung 17: Altersverteilung der weiblichen Kalotten** (An erster Stelle der Beschriftungen der Altersgruppen steht die betreffende Altersspanne in Jahren und an zweiter Stelle, fett gedruckt, die Anzahl der vorhandenen Kalotten in der jeweiligen Gruppe)

In Abbildung 17 ist ein Anstieg der Kalottenzahlen in nahezu allen Altersgruppen der Frauen bis zum 90. Lebensjahr zu erkennen, wobei die Gruppe der 60-69 –Jährigen eine Ausnahme darstellt. In der Altersgruppe der 10-19 –Jährigen und 100-109 –Jährigen sind keine Kalotten vertreten. Mit 23 Kalotten lässt sich die größte Anzahl von Kalotten in der Gruppe der 80-89 –Jährigen erkennen. Die kleinste Gruppe, mit 6 Kalotten, stellen die 90-99 –Jährigen dar. Hinsichtlich des Alters ist darüber hinaus zu erwähnen, dass die älteste Kalotte 98,07 und die jüngste Kalotte 0,26 Jahre alt ist.



**Abbildung 18: Altersverteilung der männlichen Kalotten** (An erster Stelle der Beschriftungen der Altersgruppen steht die betreffende Altersspanne in Jahren und an zweiter Stelle, fett gedruckt, die Anzahl der vorhandenen Kalotten der jeweiligen Gruppe)

In Abbildung 18 ist die Altersverteilung der männlichen Kalotten dargestellt. Hinsichtlich der Kalottenanzahl ist ein Anstieg im niedrigeren Altersbereich zu erkennen. Das Maximum ist mit 49 vertretenen Kalotten in der Altersgruppe von 40-49 Jahren zu sehen. Im höheren Altersbereich ist wieder eine Verringerung der Kalottenanzahl zu erkennen. Die wenigsten Kalotten sind mit jeweils nur einem Exemplar in den Altersgruppen der 90-99 - und 100-109 -Jährigen zu erkennen. In allen Altersgruppen sind Kalotten vertreten, wobei die älteste Schädelkalotte 100,01 Jahre und die jüngste Schädelkalotte 0,45 Jahre alt ist.

### 3.2 Korrelationsdiagramme der von dem Computerprogramm gemessenen Parameter in Abhängigkeit zum Alter der Verstorbenen

In dem folgenden Abschnitt sollen die Ergebnisse der Messungen, die von dem Computerprogramm zu den einzelnen Parametern durchgeführt wurden, mit ihren Korrelationsdiagrammen dargestellt werden. Dabei werden jeweils die Messungen der frontalen und okzipitalen Kalottenhälften für die Altersgruppe  $<20$  Jahre und  $\geq 20$  Jahre (mit Ausnahme der relativen Standardabweichung der Dicke) nach Geschlechtern getrennt in verschiedenen statistischen Kenngrößen dargestellt.

### 3.2.1 Mittelwert der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter

Der Mittelwert der Dicke pro Kalottenhälfte setzt sich aus den Einzelmessungen zur Dicke an einer Kalottenhälfte zusammen, welche von dem Computerprogramm durchgeführt wurden. Die Mittelwerte zu allen untersuchten Schädelkalotten sind in den folgenden Korrelationsdiagrammen in Abhängigkeit zum Sterbealter der dazugehörigen Person dargestellt.

#### 3.2.1.1 Mittelwert der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter für die weiblichen Schädelkalotten

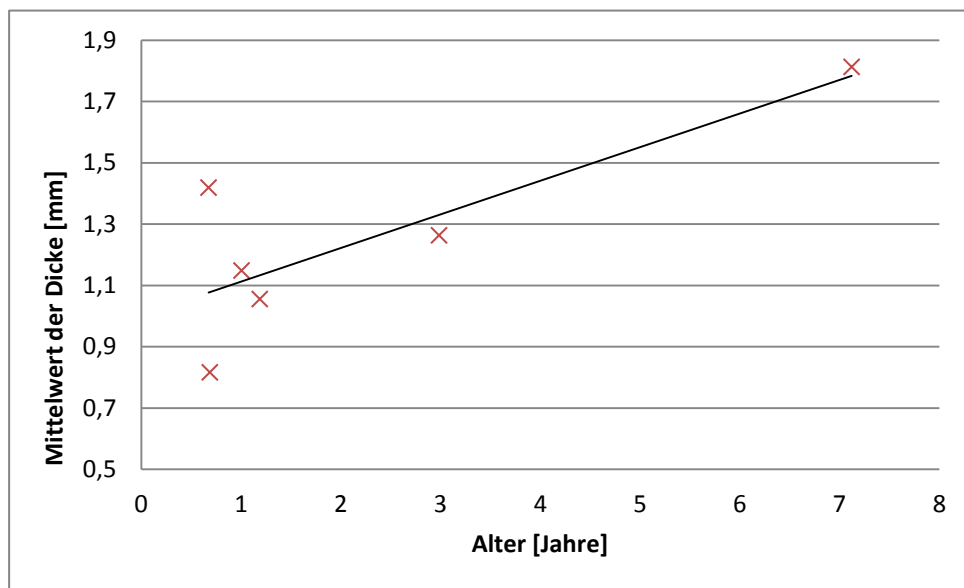
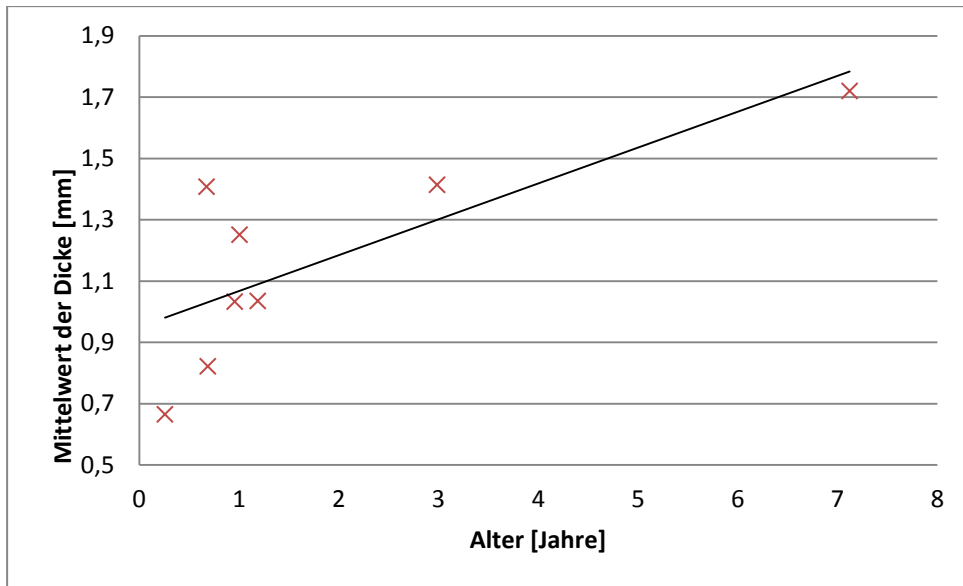
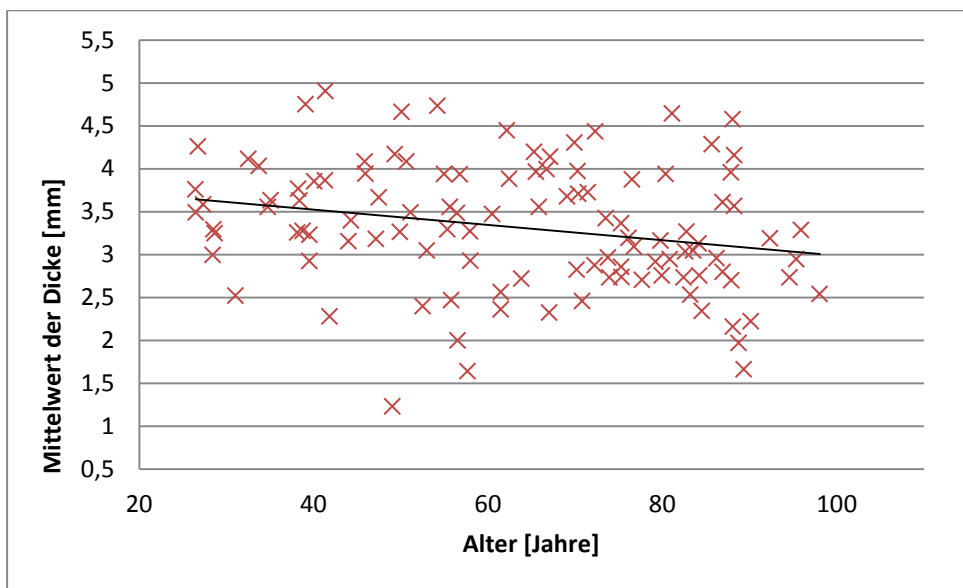


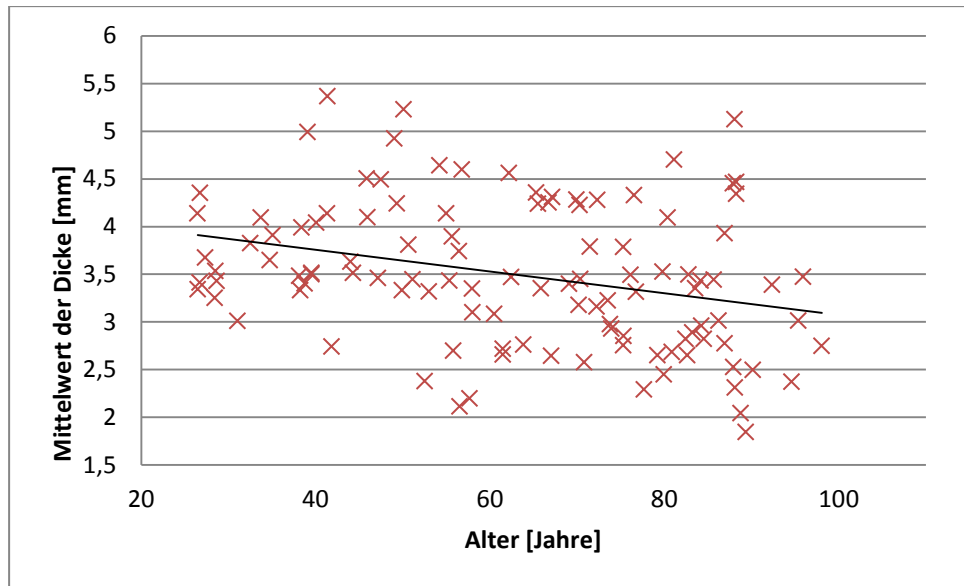
Abbildung 19: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 20:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften



**Abbildung 21:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 22: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften**

In den Abbildungen 19 bis 22 wurde der Mittelwert der Kalottendicke in mm für alle untersuchten weiblichen Kalottenhälften gegen das dazugehörige Alter in Jahren aufgetragen. In jedem Korrelationsdiagramm gibt die Linie die lineare Regression der untersuchten Parameter an. Die dazugehörigen Regressionswerte sind in Tabellen 3 und 4 dargestellt. Wie in den Abbildungen 19 und 20 zu erkennen, konnten für die Altersgruppe  $< 20$  Jahre bei 8 untersuchten Schädelkalotten 6 frontale und 8 okzipitale weibliche Kalottenhälften ausgewertet werden. Diese Differenz der Anzahl von untersuchten Kalottenhälften kommt durch für die automatische Messung ungeeignete Aufnahmen von einzelnen Kalottenhälften bzw. durch technische Ausfälle des eLU, die die radiologische Erfassung von Daten einzelner Kalottenhälften verhinderte, zustande. Bei diesen Kalotten im Alter von 0,3 bis 7 Jahren ist ein Anstieg der mittleren Kalottendicke, sowohl in den frontalen als auch in den okzipitalen Bereichen, zu erkennen. In den Abbildungen 21 und 22 sind die Mittelwerte der Kalottendicken für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre dargestellt. Hier wurden Schädelkalotten von 112 weiblichen Individuen im Alter von 26 bis 98 Jahren untersucht. Sowohl für den frontalen als auch für den okzipitalen Bereich ist eine leichte Abnahme der mittleren Kalottendicke im Alter zu erkennen.

### 3.2.1.2 Mittelwert der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter für die männlichen Schädelkalotten

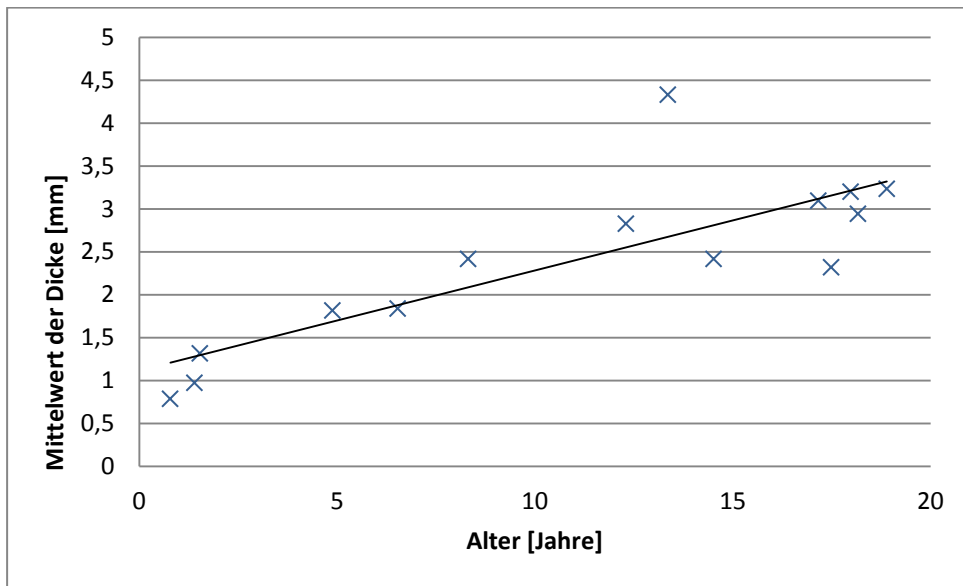


Abbildung 23: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften

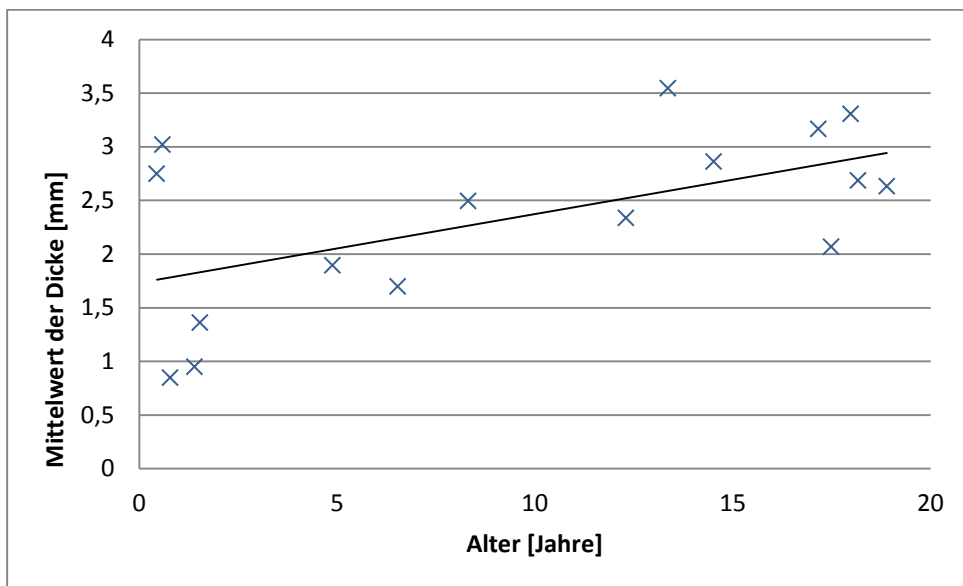
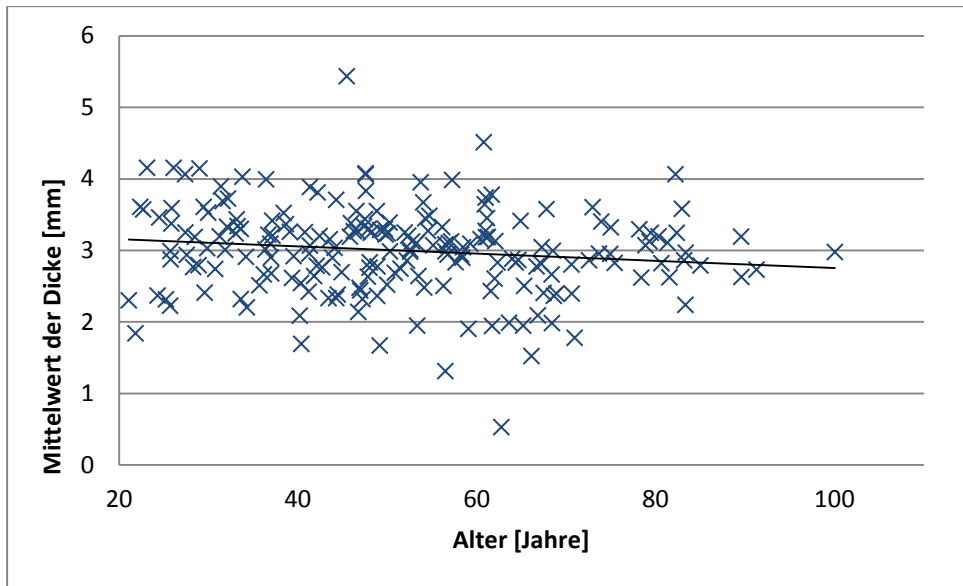
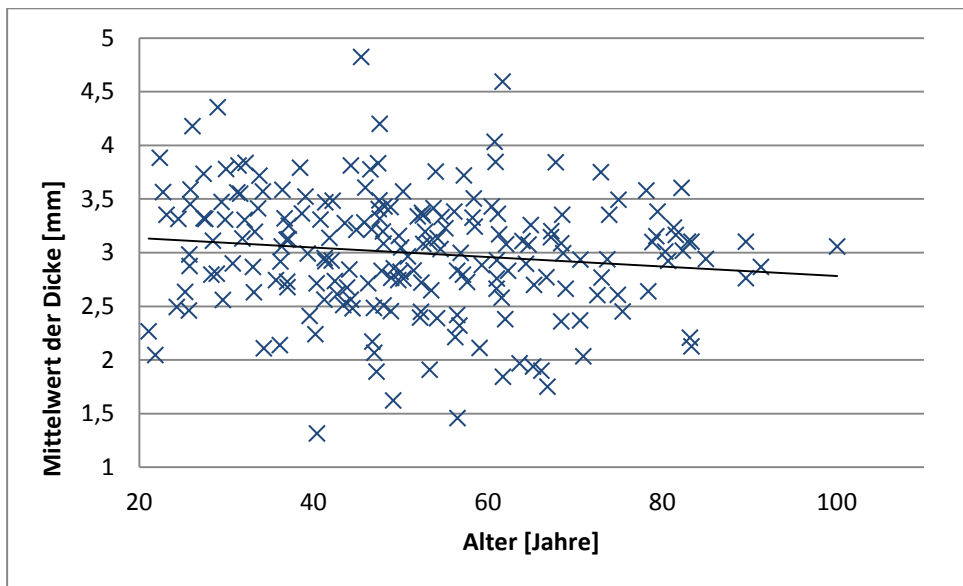


Abbildung 24: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften





**Abbildung 25:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 26:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften

Die Abbildungen 23 bis 26 zeigen den Zusammenhang des Mittelwertes der Kalottendicke mit dem Alter aller männlichen untersuchten Kalotten. Die Abbildungen 23 und 24 beziehen sich auf die Altersgruppe  $< 20$  Jahre, in der insgesamt 16 Schädelkalotten im Alter von 0,5 bis 18 Jahren untersucht wurden. Hier lässt sich sowohl im frontalen als auch im okzipitalen Bereich, ähnlich wie bei der jungen Altersgruppe der weiblichen Kalotten, ein deutlich positiver Zusammenhang zwischen der mittleren Kalottendicke

und dem Alter erkennen. In den Abbildungen 25 und 26 ist der Zusammenhang des Mittelwertes der Kalottendicke mit dem Alter der anderen Altersgruppe,  $\geq 20$  Jahre, dargestellt. Es sind 208 Schädelkalotten im Alter von 21 bis 100 Jahren untersucht worden. Hier ist ein negativer Zusammenhang zu erkennen. Die mittlere Kalottendicke nimmt also auch bei den männlichen Kalotten ab. Der Korrelationskoeffizienten der Frauen in der Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre ist allerdings deutlich stärker negativ als bei den Männern.

### 3.2.2 Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter

In einem weiteren Schritt wurde die Standardabweichung der Knochendicke der Schädelkalotten, welche im vorigen Abschnitt hinsichtlich der mittleren Dicke beschrieben wurden, ermittelt. So konnte die Streuung der durchschnittlich 6176 Liniensegmente pro Kalottenhälften hinsichtlich der Dicke bezogen auf den Mittelwert dargestellt werden.

#### 3.2.2.1 Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter für die weiblichen Schädelkalotten

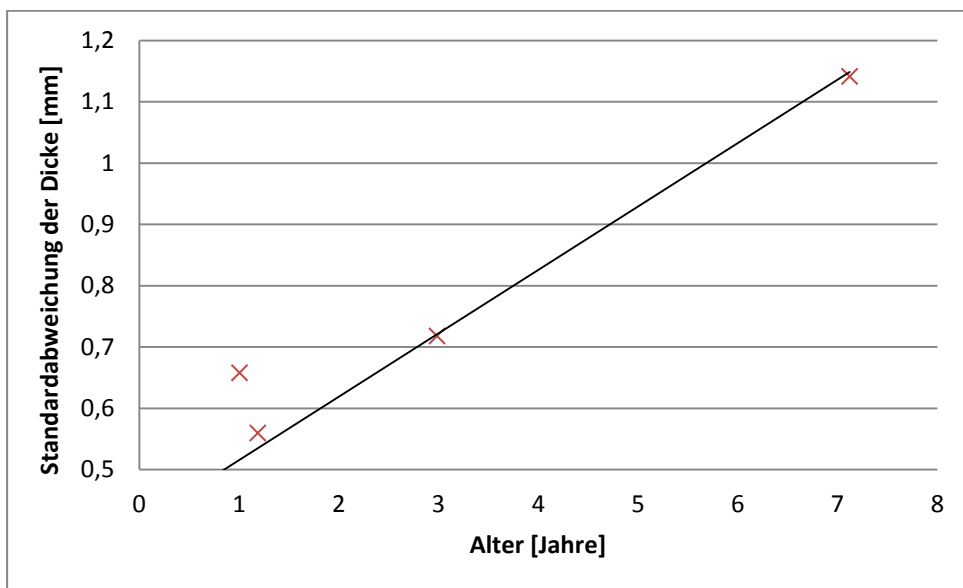
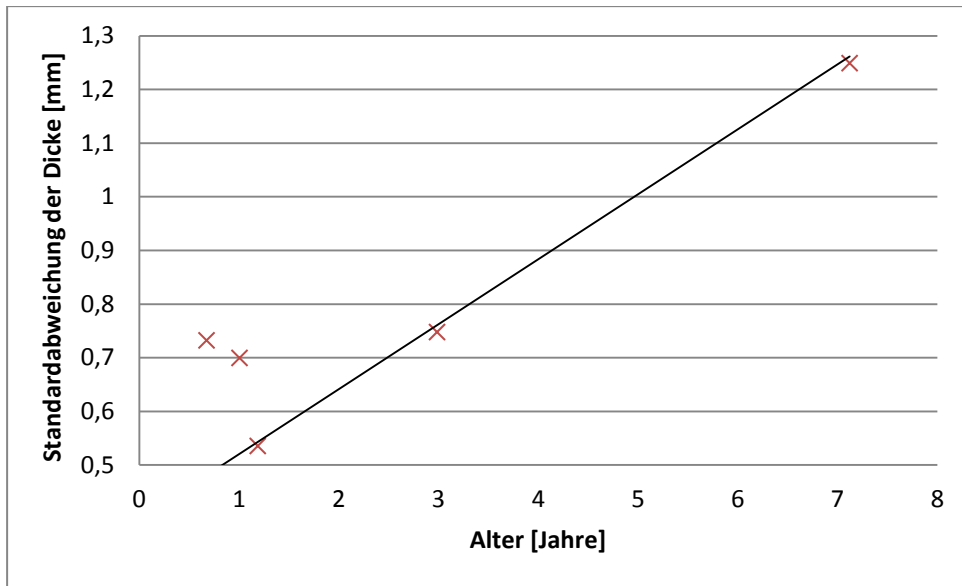
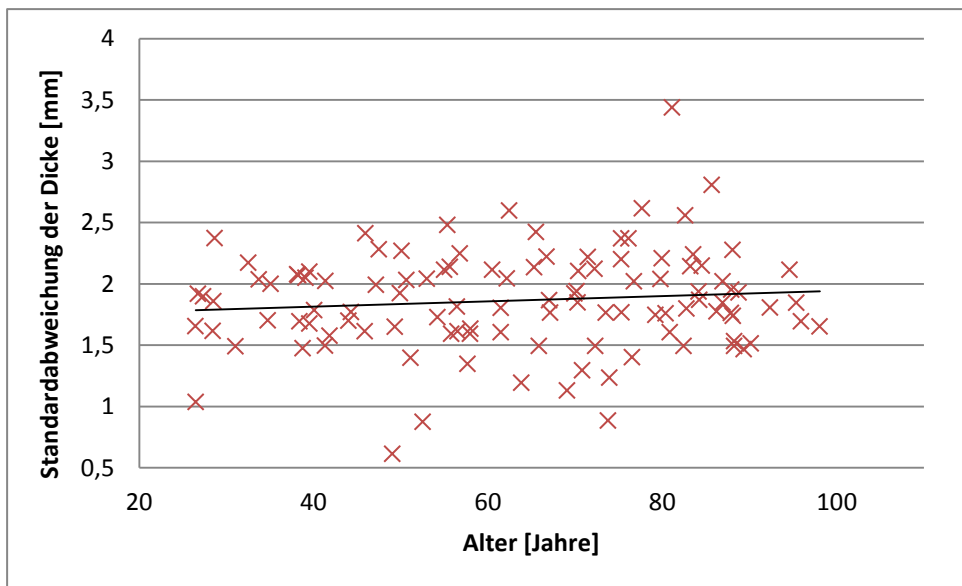


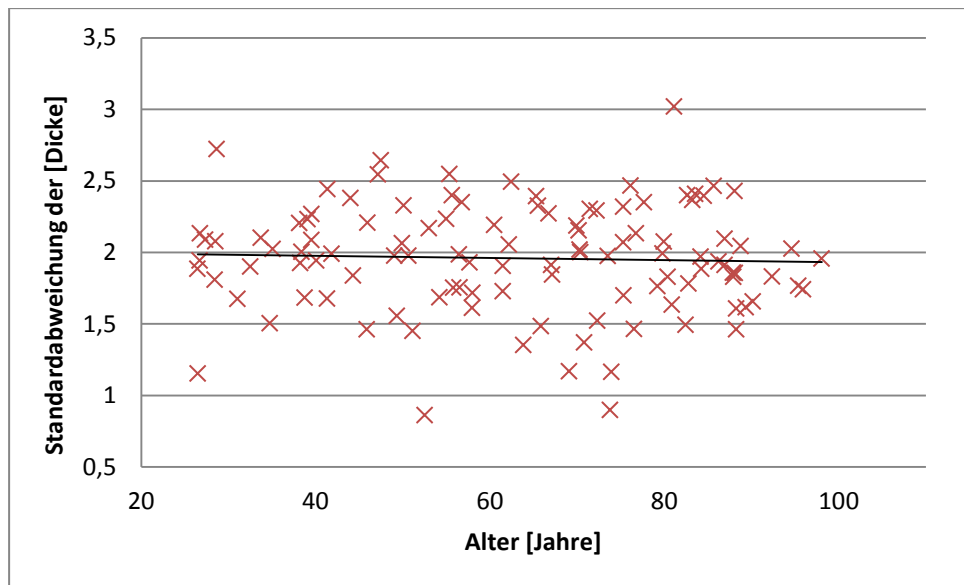
Abbildung 27: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $<20$  Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 28:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften



**Abbildung 29:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 30: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften**

Die Standardabweichung der Kalottendicke der weiblichen Schädelkalotten in Bezug auf das Alter ist in den Abbildungen 27 bis 30 dargestellt. Das Untersuchungskollektiv ist identisch mit dem der Untersuchungen zum Mittelwert der Kalottendicke. In jedem Korrelationsdiagramm gibt die Linie die lineare Regression der untersuchten Parameter an. In den Abbildungen 27 und 28 ist die Standardabweichung der Kalottendicke in Korrelation zum Alter der weiblichen Gruppe  $< 20$  Jahre dargestellt. Mit Korrelationskoeffizienten von 0,94 für den frontalen und 0,88 für den okzipitalen Kalottenbereich ist hier ein besonders deutlicher Zusammenhang mit dem Alter zu erkennen (siehe Tabelle 3). In der Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, welche in den Abbildungen 29 und 30 dargestellt ist, wird im frontalen Kalottenbereich eine leicht positiver und im okzipitalen Bereich eine leicht negativer Zusammenhang mit dem Alter deutlich.

### 3.2.2.2 Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter für die männlichen Schädelkalotten

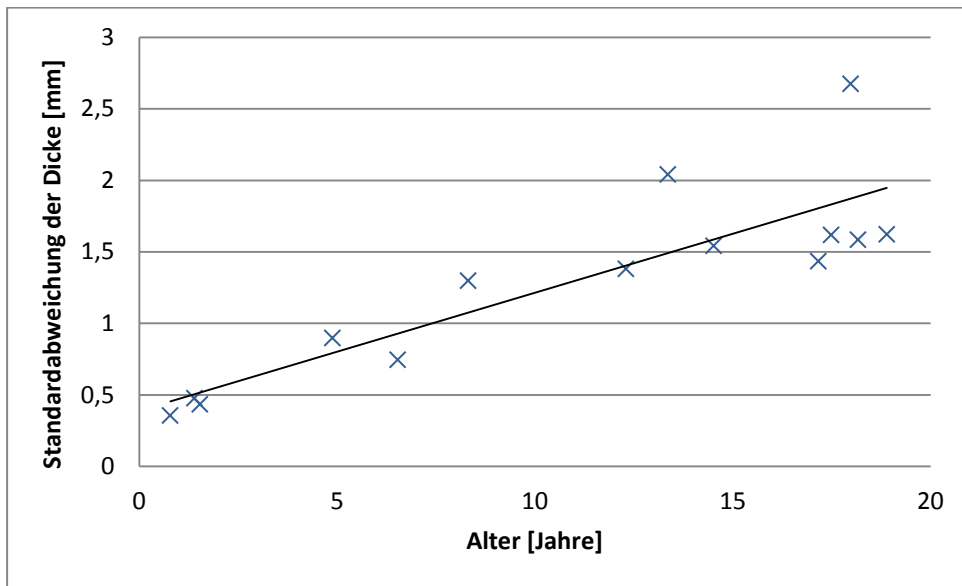


Abbildung 31: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälfen

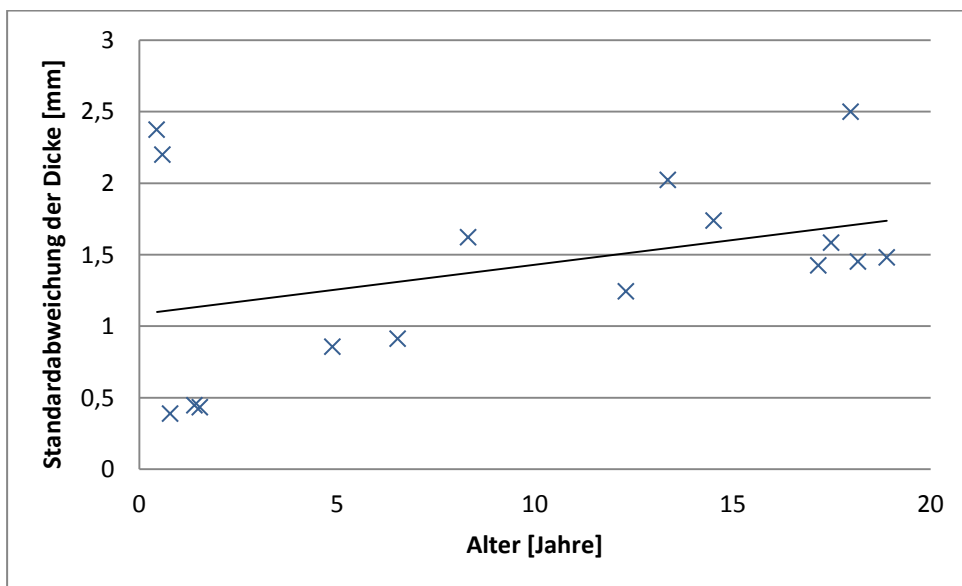
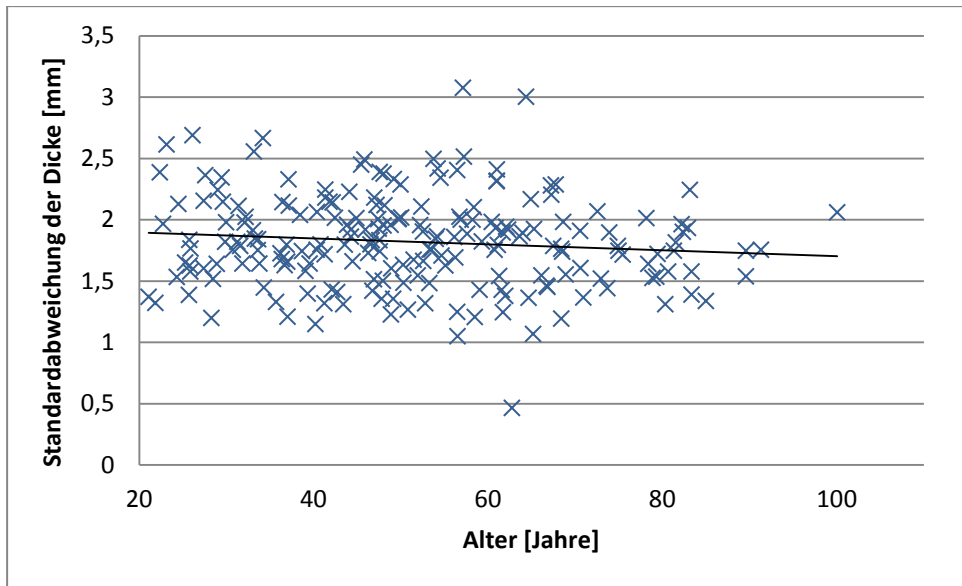
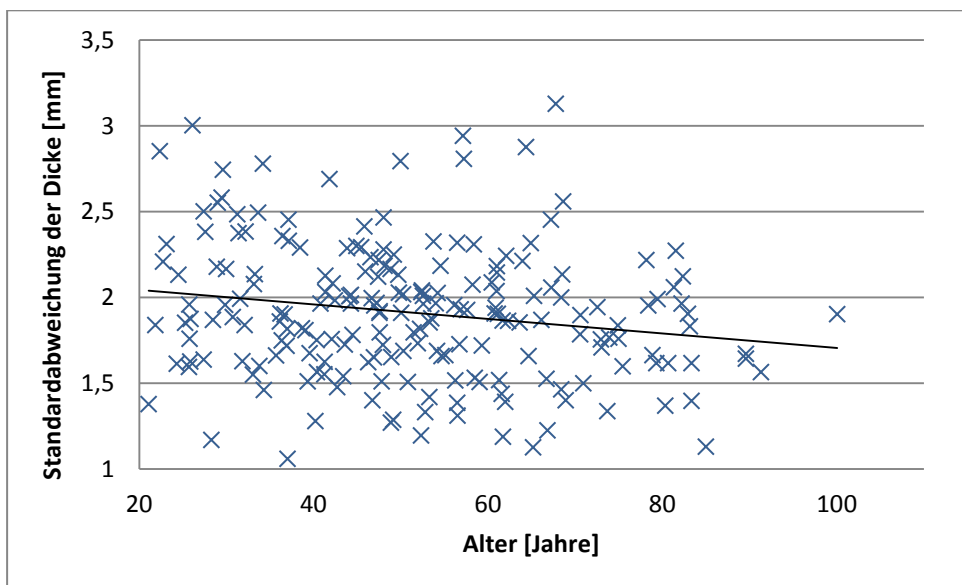


Abbildung 32: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfen



**Abbildung 33:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 34:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften

In den Abbildungen 31 bis 34 ist die Standardabweichung der Kalottendicke der männlichen Schädelkalotten in Abhängigkeit zum Alter dargestellt. Für die Altersgruppe  $< 20$  Jahre (Abbildung 31 und 32) lässt sich in beiden Kalottenhälften ein positiver Zusammenhang zum Alter feststellen. In der Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre steht die Standardabweichung der Kalottendicke in einem sehr leicht negativen Zusammenhang zum Alter. Im

Vergleich zu der weiblichen Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre ist insgesamt kein großer Unterschied zu erkennen.

### 3.2.3 Relative (prozentuale) Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter

Die relative (prozentuale) Standardabweichung ergibt sich aus dem Quotienten der Standardabweichung und dem Mittelwert der Dicke und wird hier jeweils auf eine Kalottenhälfte bezogen dargestellt. Dieser Parameter wurde nicht nach Altersbereichen getrennt, sondern für alle vorhandenen Altersbereiche gemeinsam betrachtet.

#### 3.2.3.1 Relative (prozentuale) Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte für die weiblichen Schädelkalotten

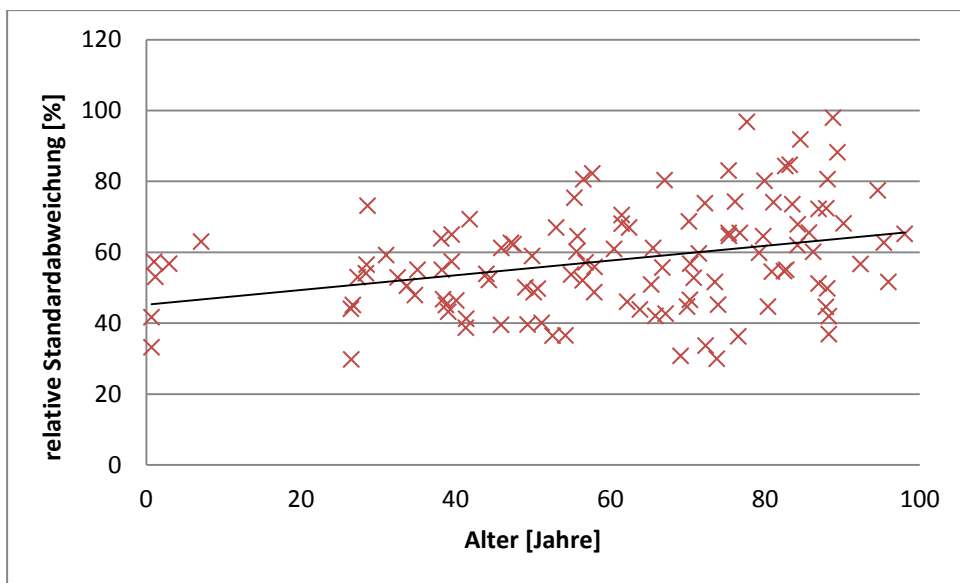
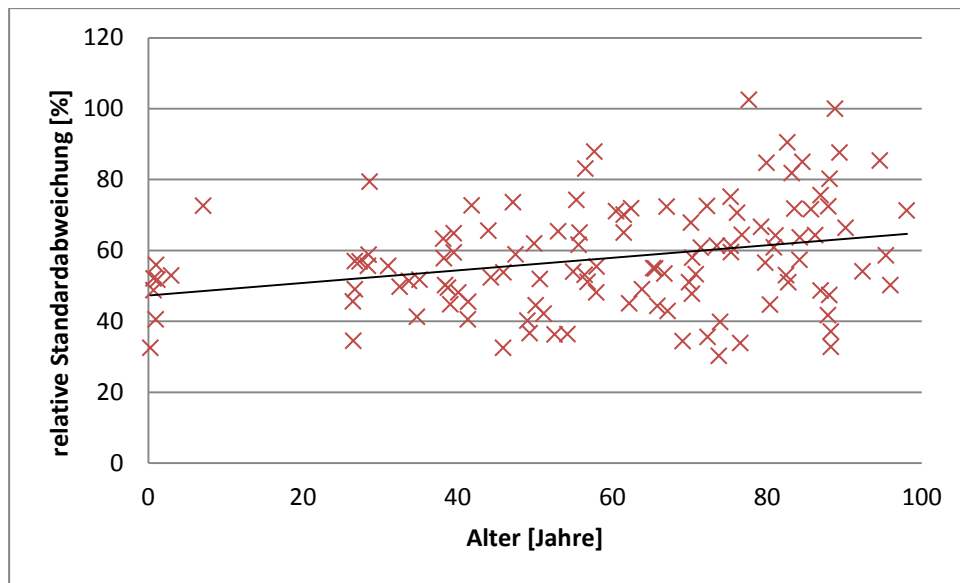


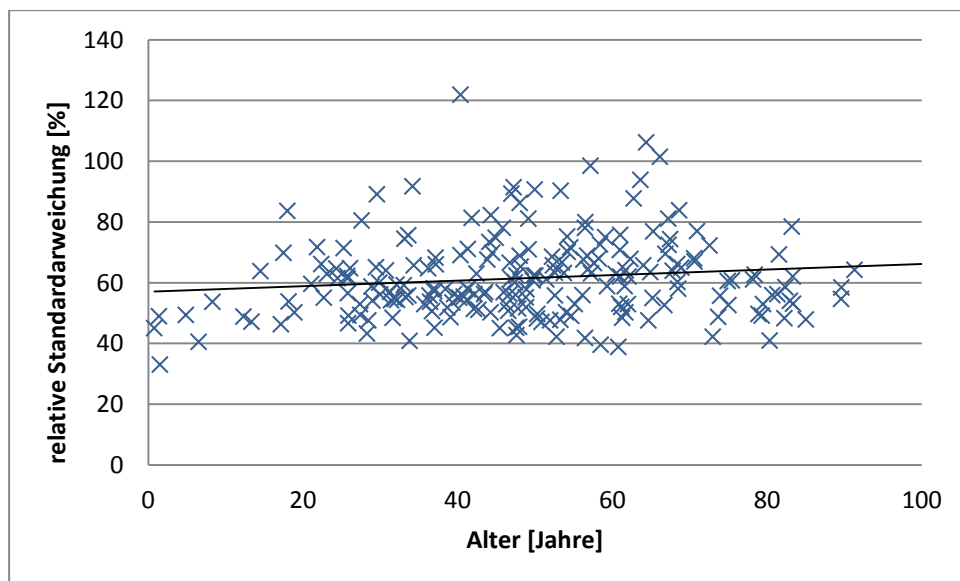
Abbildung 35: Korrelationsdiagramm der Funktion „relative (prozentuale) Standardabweichung“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für alle Altersbereiche, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 36:** Korrelationsdiagramm der Funktion „relative (prozentuale) Standardabweichung“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für alle Altersbereiche, okzipitale Kalottenhälften

In den Abbildungen 35 und 36 ist die Korrelation zwischen der relativen (prozentualen) Standardabweichung und dem Alter aller Altersbereiche der Frauen dargestellt. Sowohl im frontalen als auch im okzipitalen Kalottenbereich ist eine sehr leichte positive Korrelation mit einer starken Streuung zu erkennen.

### 3.2.3.2 Relative (prozentuale) Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte für die männlichen Schädelkalotten



**Abbildung 37:** Korrelationsdiagramm der Funktion „relative (prozentuale) Standardabweichung“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für alle Altersbereiche, frontale Kalottenhälften



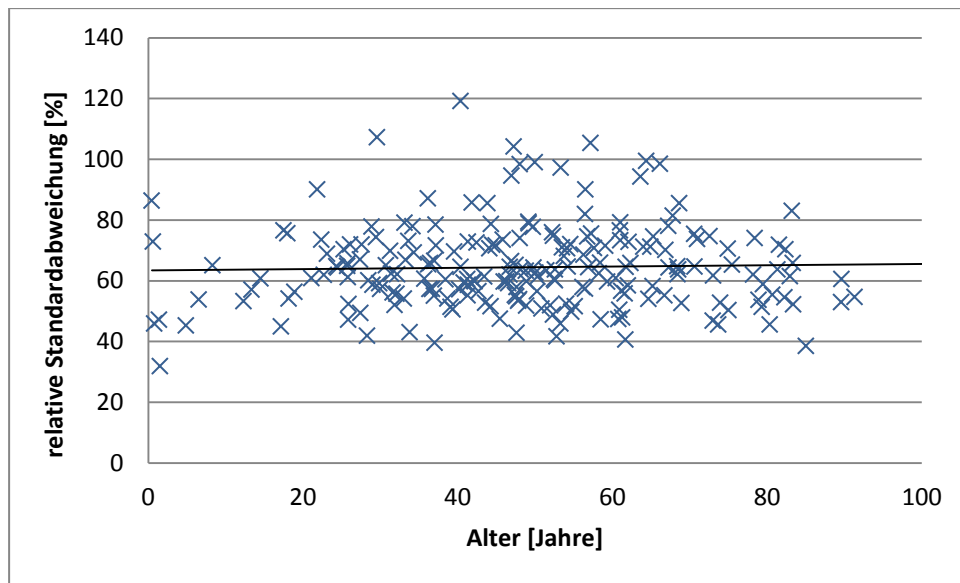


Abbildung 38: Korrelationsdiagramm der Funktion „relative (prozentuale) Standardabweichung“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für alle Altersbereiche, okzipitale Kalottenhälften

Abbildungen 37 und 38 zeigen die Korrelation zwischen der relativen (prozentualen) Standardabweichung und dem Alter aller Altersbereiche der Männer. Hier ist eine noch geringere Korrelation der Parameter als bei den Frauen zu erkennen.

### 3.2.4 Mittelwert der Gesamtsumme der HE pro Kalottenhälfte

Im folgenden Abschnitt wird der Mittelwert der Gesamtsumme der Hounsfield-Einheiten der jeweiligen Kalottenhälften in Abhängigkeit zum Alter dargestellt. Die Gesamtsumme der HE ist die Summe aller HE, die bei jeder Einzelmessung der durchschnittlich 6176 Liniensegmenten pro Kalottenhälfte gemessen wurde. Für alle folgenden Korrelationsanalysen ist das Untersuchungskollektiv mit dem bereits beschriebenen identisch.

### 3.2.4.1 Mittelwert der Gesamtsumme der HE pro Kalottenhälfte für die weiblichen Schädelkalotten

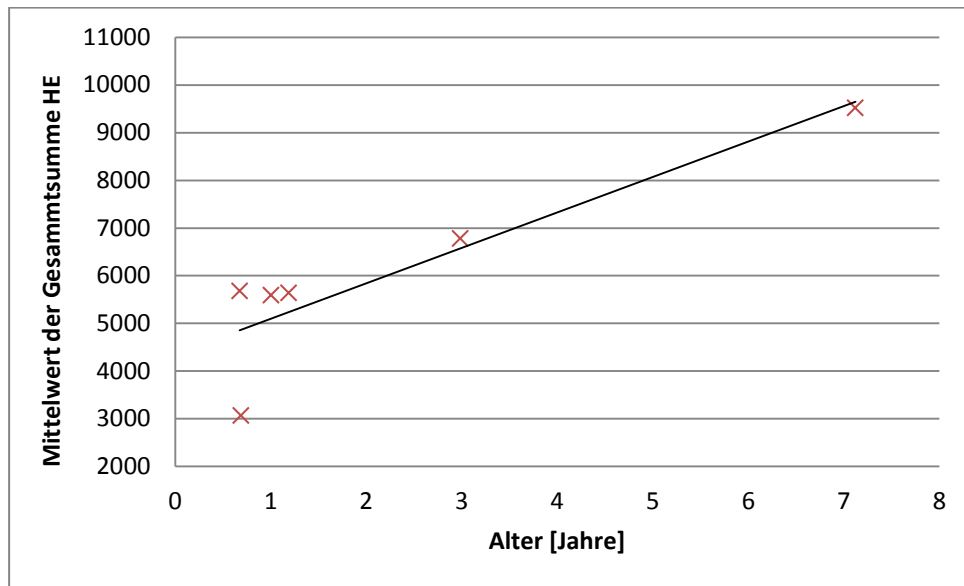


Abbildung 39: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften

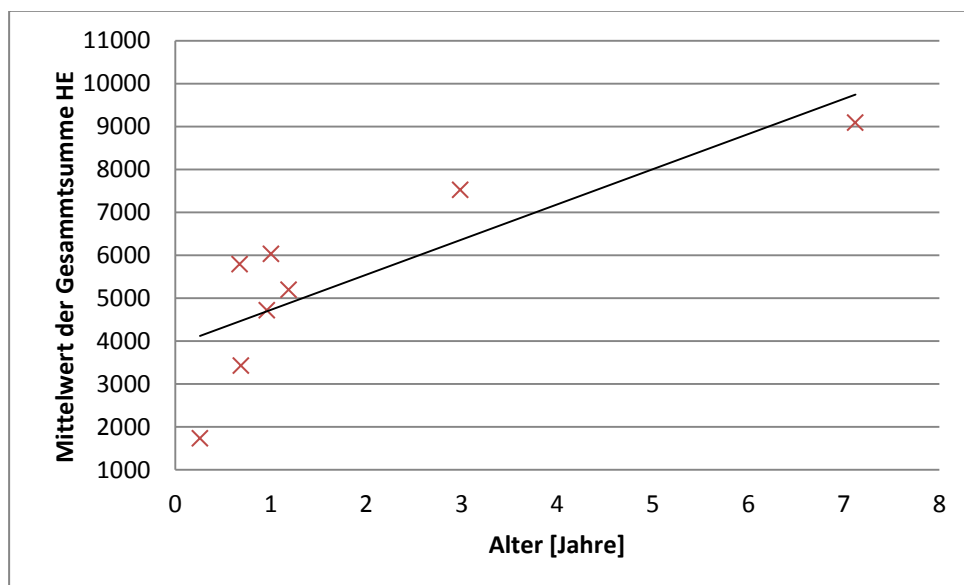
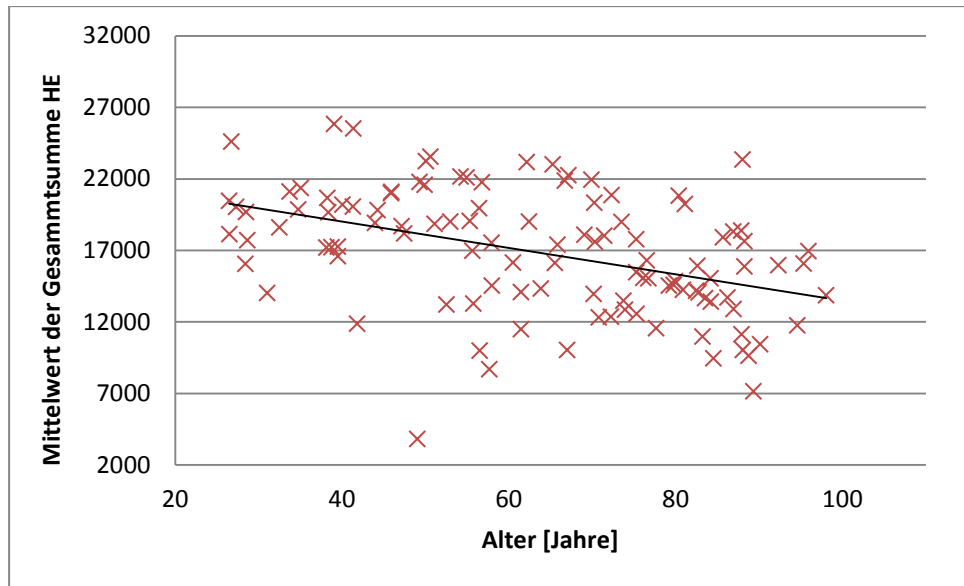
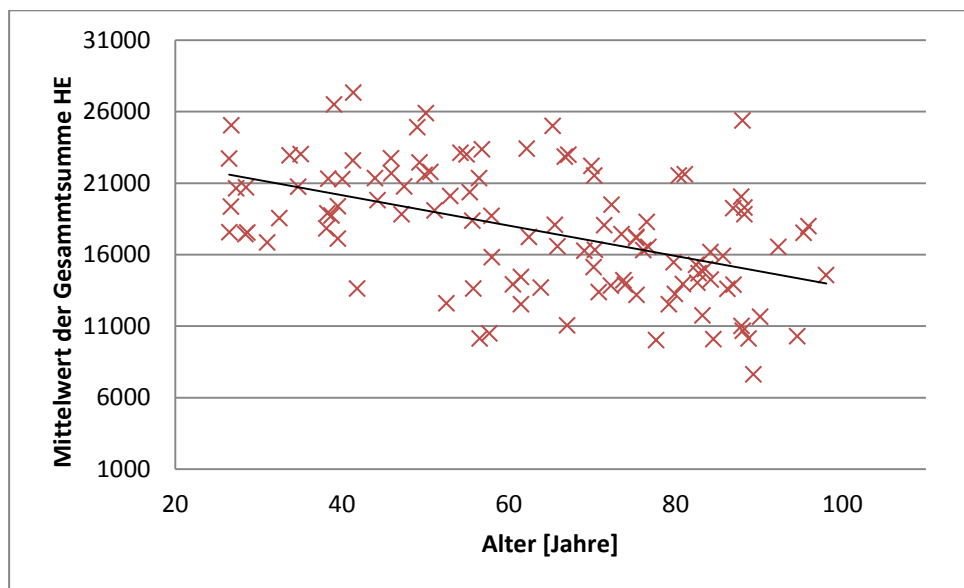


Abbildung 40: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften



**Abbildung 41:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 42:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften

In den Abbildungen 39 bis 42 wird die Abhängigkeit der mittleren Knochendichte der weiblichen Kalottenhälften in Hounsfield-Einheiten in Abhängigkeit zum Alter in Jahren dargestellt. Abbildung 39 und 40 beschreiben hierbei die Ergebnisse der Altersgruppe  $< 20$  Jahre. Hier ist sowohl bei den frontalen als auch bei den okzipitalen Kalottenhälften eine deutlich positive Korrelation zwischen der Knochendichte und dem Alter zu erkennen. Die Korrelationsdiagramme der Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre (Abbildung 41

und 42) machen sowohl für die frontale als auch für die okzipitale Kalottenhälfte einen erkennbaren negativen Zusammenhang der mittleren Knochendichte der weiblichen Schädelkalotten in Bezug auf das Alter deutlich. Dies lässt sich auch an den Korrelationskoeffizienten von -0,43 für den frontalen Teil und -0,49 für den okzipitalen Teil der Kalotten deutlich erkennen.

### 3.2.4.2 Mittelwert der Gesamtsumme der HE pro Kalottenhälfte für die männlichen Schädelkalotten

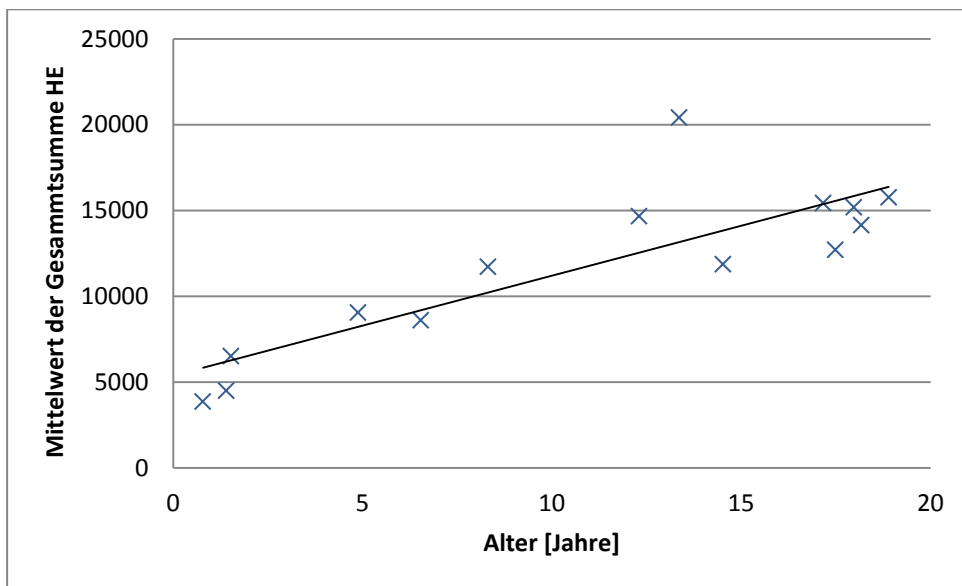


Abbildung 43: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften

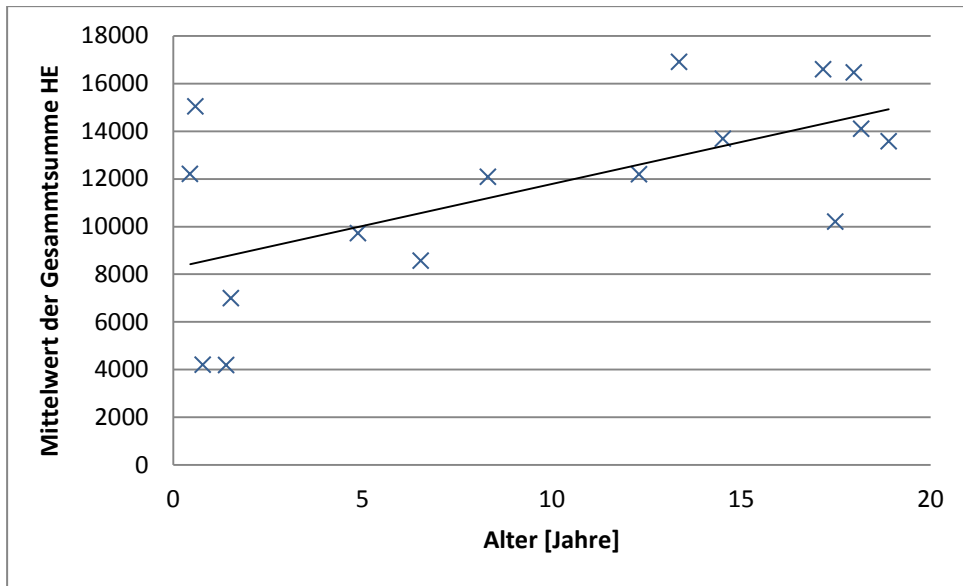


Abbildung 44: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften

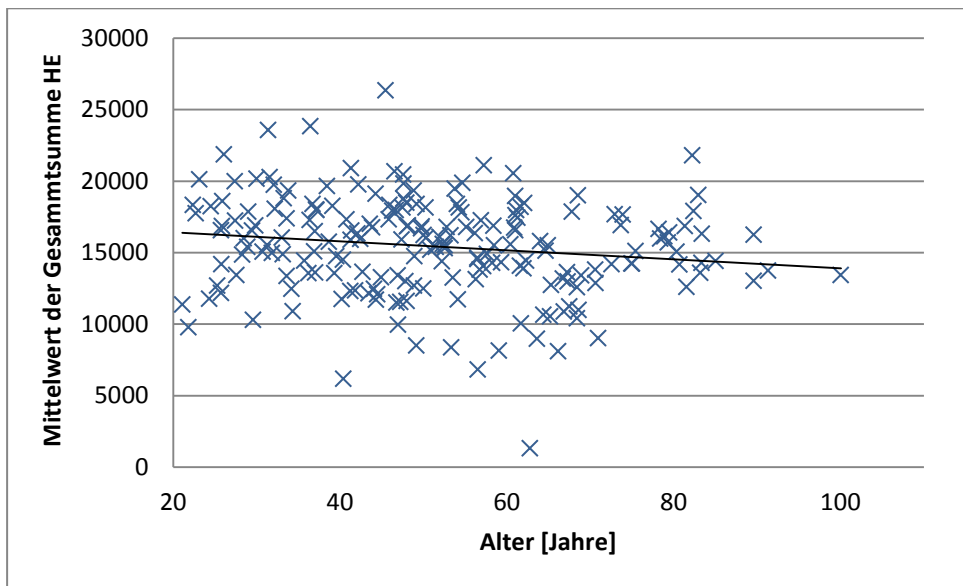
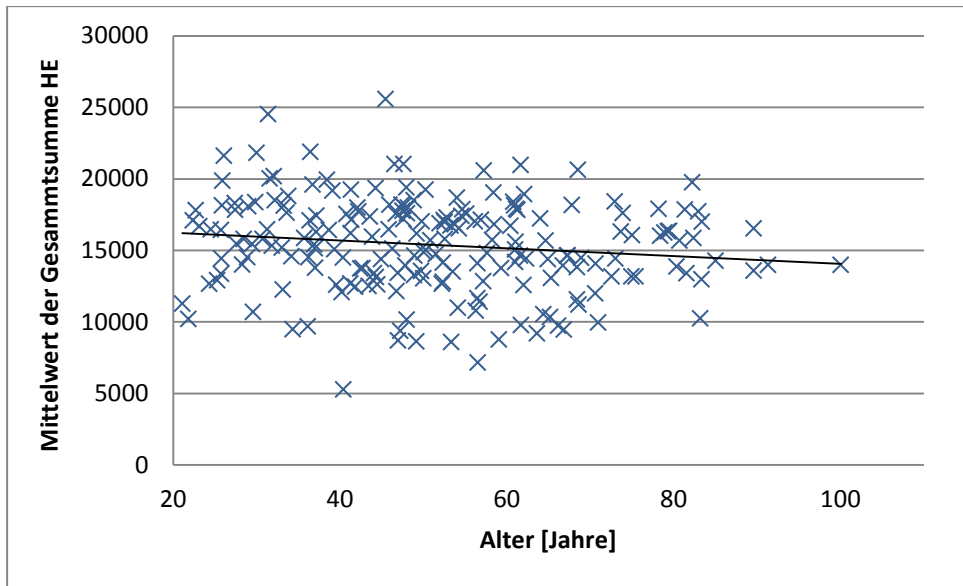


Abbildung 45: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 46: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften**

Der Mittelwert der Gesamtsumme der HE der männlichen Schädelkalotten wird in den Abbildungen 43 bis 46 im Zusammenhang zum Alter dargestellt. Die Knochendichte der frontalen und okzipitalen Kalottenhälften in der Altersgruppe  $< 20$  Jahre verhält sich in einem positiven Zusammenhang zum Alter der Schädelkalotten. Die negative Korrelation der Gruppe  $\geq 20$  Jahre (Abbildung 45 und 46) ist mit Korrelationskoeffizienten von  $-0,16$  für den frontalen und  $-0,14$  für den okzipitalen Kalottenbereich deutlich weniger stark als bei der vergleichbaren Altersgruppe der Frauen.

### 3.2.5 Standardabweichung der Gesamtsumme der HE pro Kalottenhälfte

In den folgenden Korrelationsdiagrammen wird die Standardabweichung der Gesamtsumme der Hounsfield-Einheiten auf ihre Abhängigkeit vom Alter untersucht. Für jede Kalottenhälfte wurde aus allen Messungen der Liniensegmente die Standardabweichung berechnet.

### 3.2.5.1 Standardabweichung der Gesamtsumme der HE pro Kalottenhälfte für die weiblichen Schädelkalotten

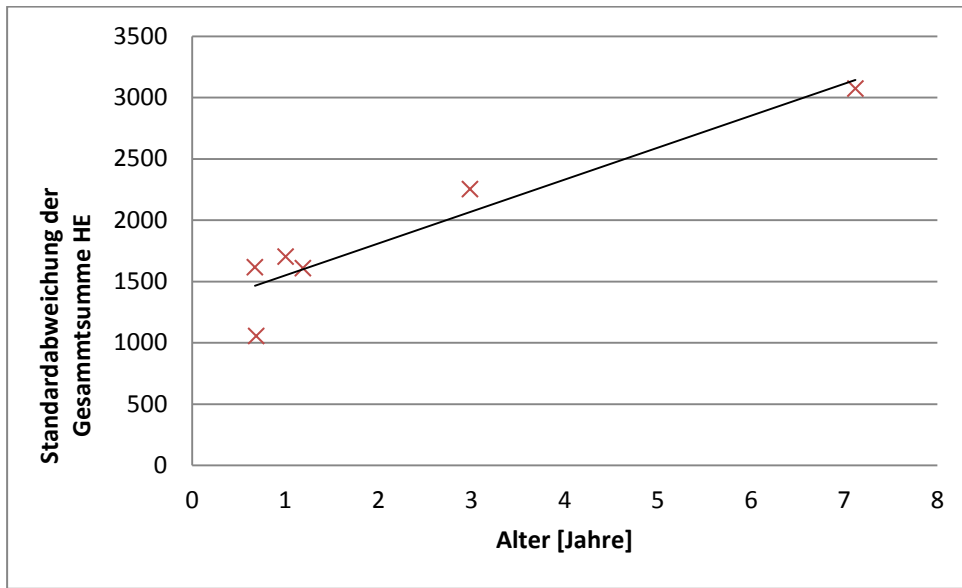


Abbildung 47: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften

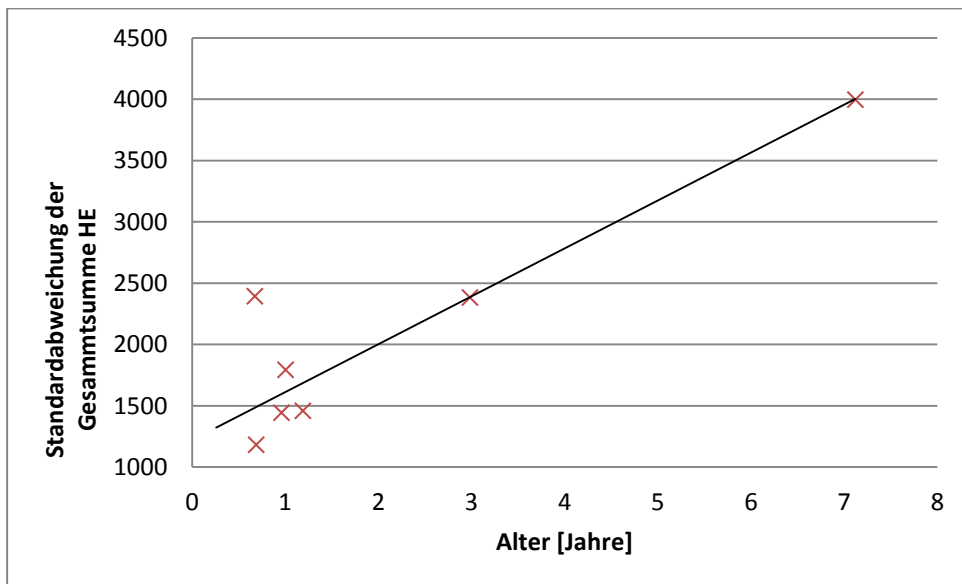
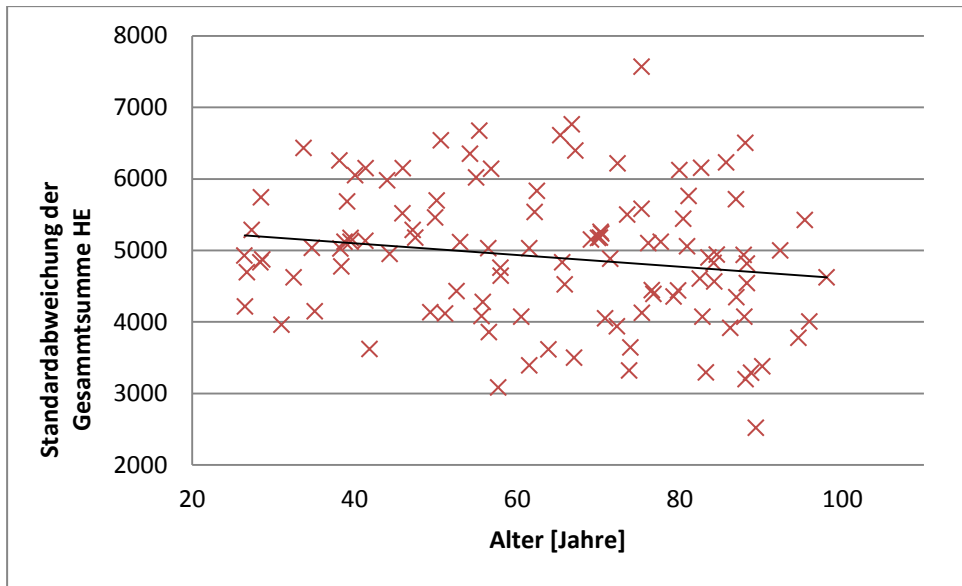
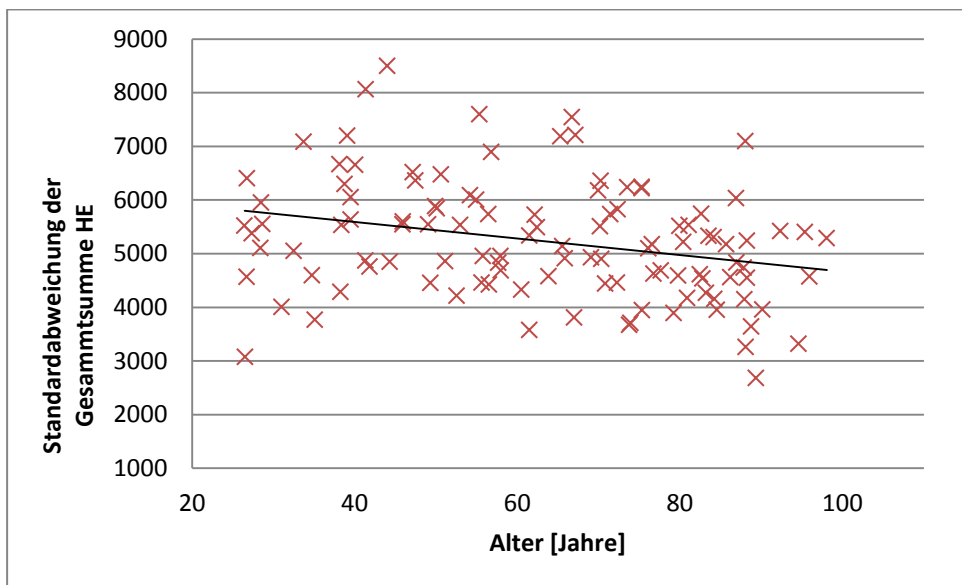


Abbildung 48: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften



**Abbildung 49:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 50:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften

Die Abbildungen 47 bis 50 zeigen die Korrelation der Standardabweichung der Gesamtsumme der HE für die weiblichen Schädelkalotten in Abhängigkeit vom Alter. In den Abbildungen 47 und 48 sind diese Parameter für die Altersgruppe  $< 20$  Jahre dargestellt. Die Standardabweichung der Gesamtsumme der HE korreliert hier sowohl im frontalen als auch im okzipitalen Kalottenbereich besonders stark mit dem Alter. In der Alters-



gruppe  $\geq 20$  Jahre ist nur eine geringe negative Korrelation der untersuchten Parameter zu erkennen, wobei in der okzipitalen Kalottenregion eine etwas stärkere Korrelation als in der frontalen Region zu erkennen ist.

### 3.2.5.2 Standardabweichung der Gesamtsumme der HE pro Kalottenhälfte für die männlichen Schädelkalotten

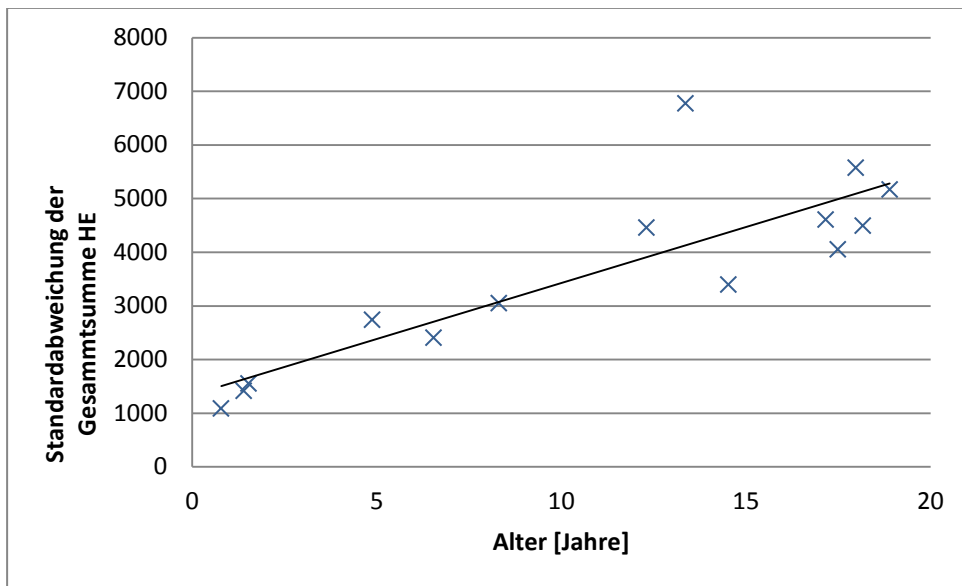


Abbildung 51: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $<20$  Jahre, frontale Kalottenhälften

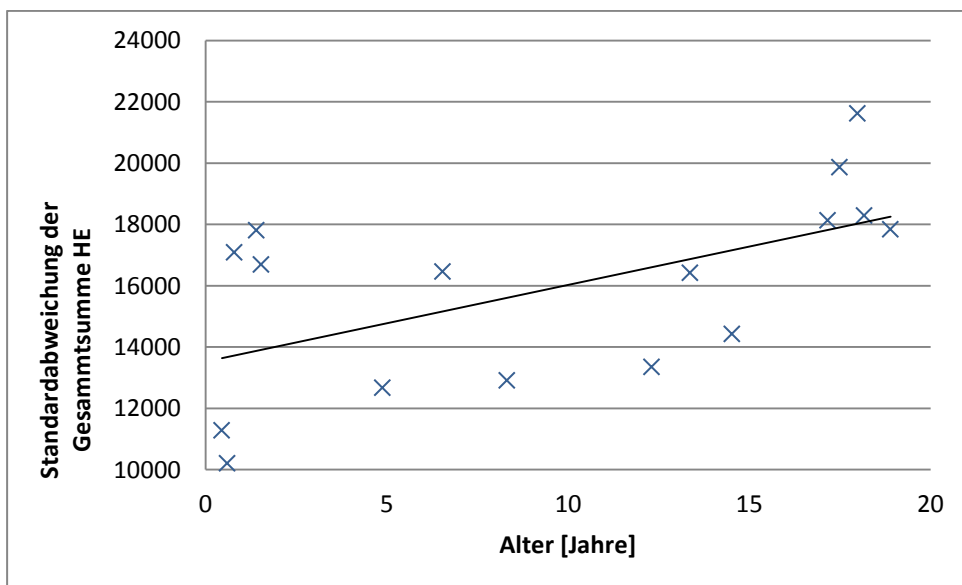
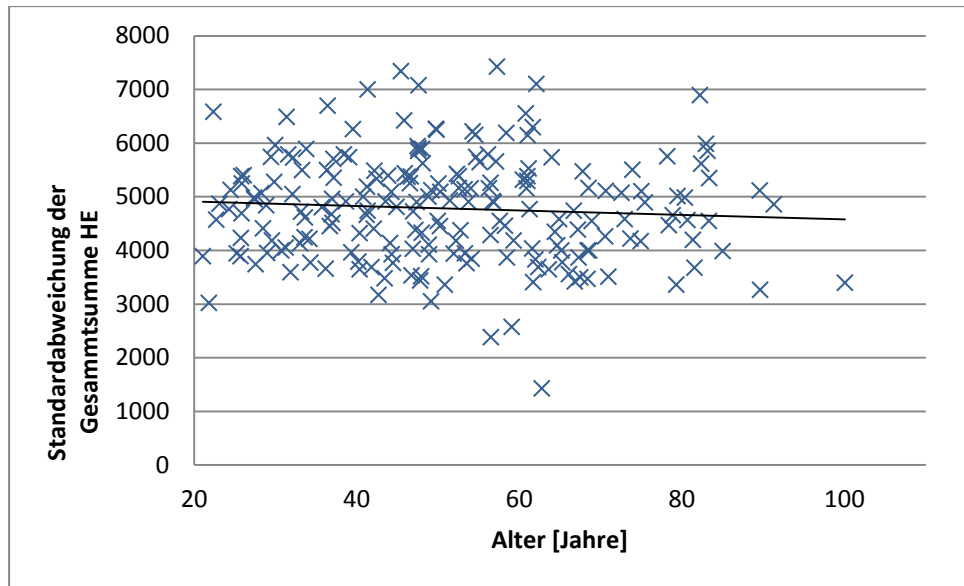
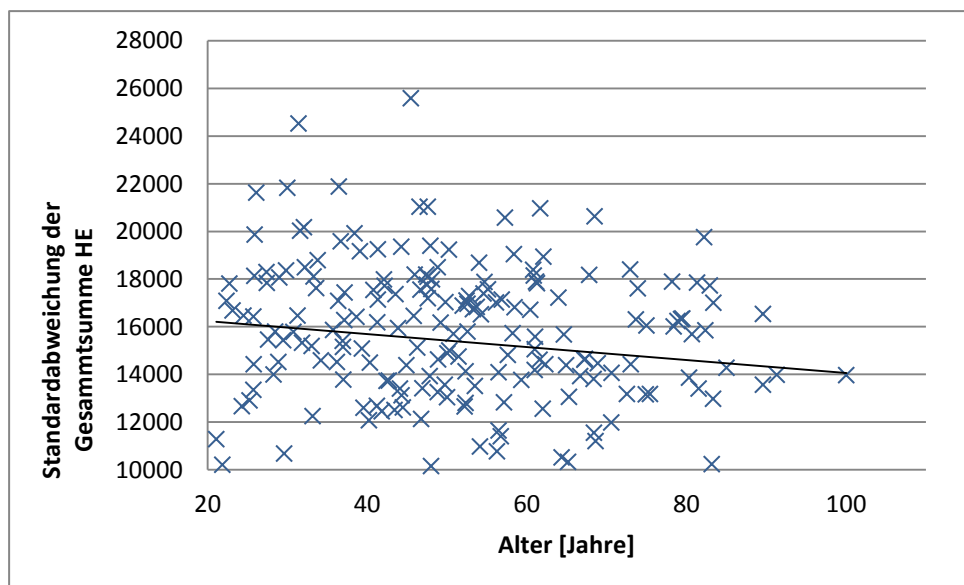


Abbildung 52: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $<20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften



**Abbildung 53:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 54:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften

In den Abbildungen 52 bis 54 ist die Standardabweichung der Gesamtsumme der HE der männlichen Schädelkalotten gegen das Alter aufgetragen. Hier ist in beiden Altersgruppen eine geringere Korrelation der Parameter als in den vergleichbaren Gruppen der weiblichen Kalotten zu erkennen. Es ist allerdings auch hier in der Gruppe  $< 20$  Jahre eine positive Abhängigkeit der Standardabweichung der Gesamtsumme der HE vom

Alter zu erkennen (Abbildung 51 und 52). In den Abbildungen 53 und 54 ist die Korrelation der Parameter für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sowohl im frontalen als auch im okzipitalen Bereich praktisch keine Korrelation der Standardabweichung der Gesamtsumme der HE mit dem Alter vorliegt.

### 3.2.6 Mittelwert des Mittelwertes der HE pro Kalottenhälfte

Dieser Parameter, welcher in Abhängigkeit zum Alter dargestellt wird, hat als Grundlage die jeweiligen Mittelwerte der HE, welche jeweils in einem Liniensegment gemessen wurden. Aus den durchschnittlich 6176 so entstandenen Mittelwerten zu jeder Schädelkalotte wurde dann wiederum der Mittelwert für jede Kalottenhälfte berechnet. Diese sind in den folgenden Korrelationsdiagrammen gegen das Alter aufgetragen.

#### 3.2.6.1 Mittelwert des Mittelwertes der HE pro Kalottenhälfte für die weiblichen Schädelkalotten

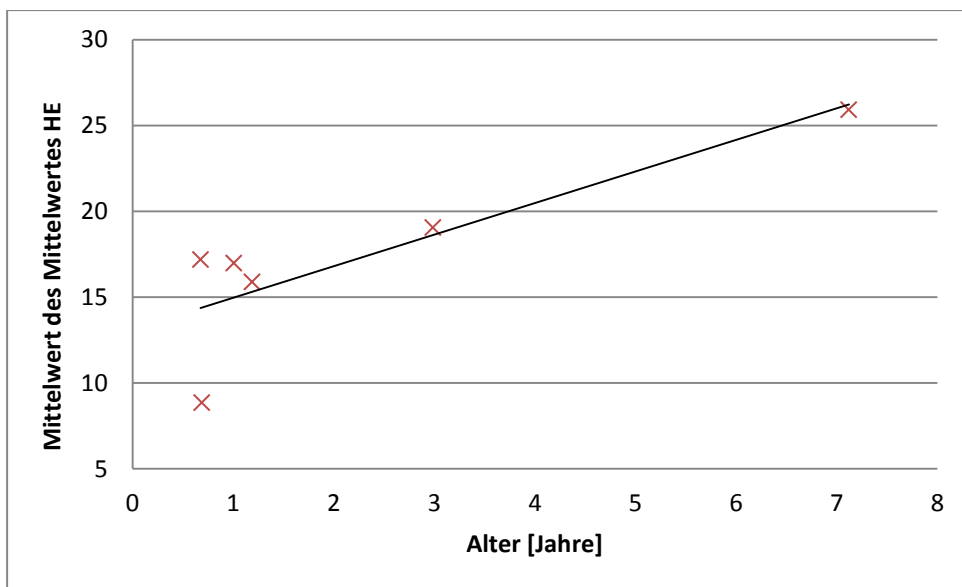


Abbildung 55: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $<20$  Jahre, frontale Kalottenhälften

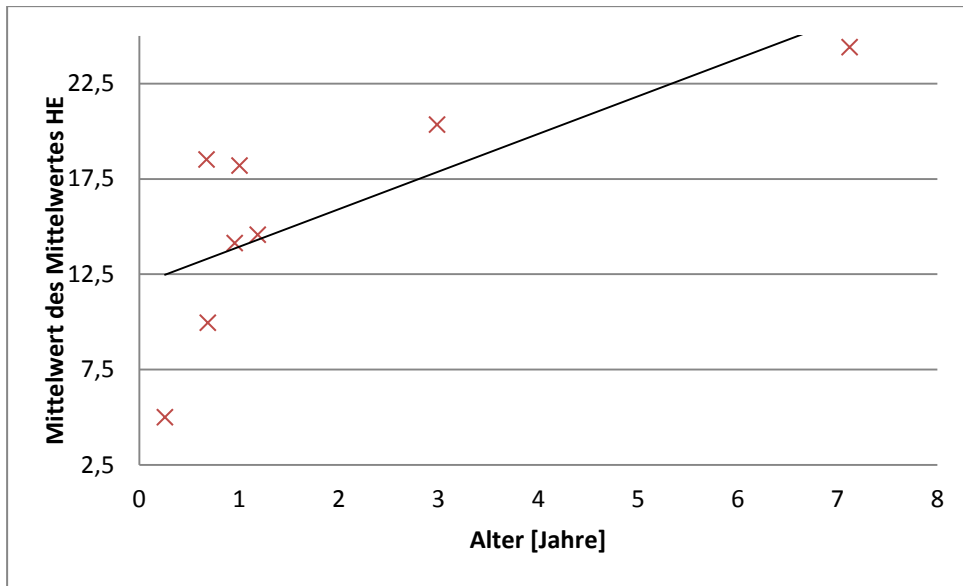


Abbildung 56: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften

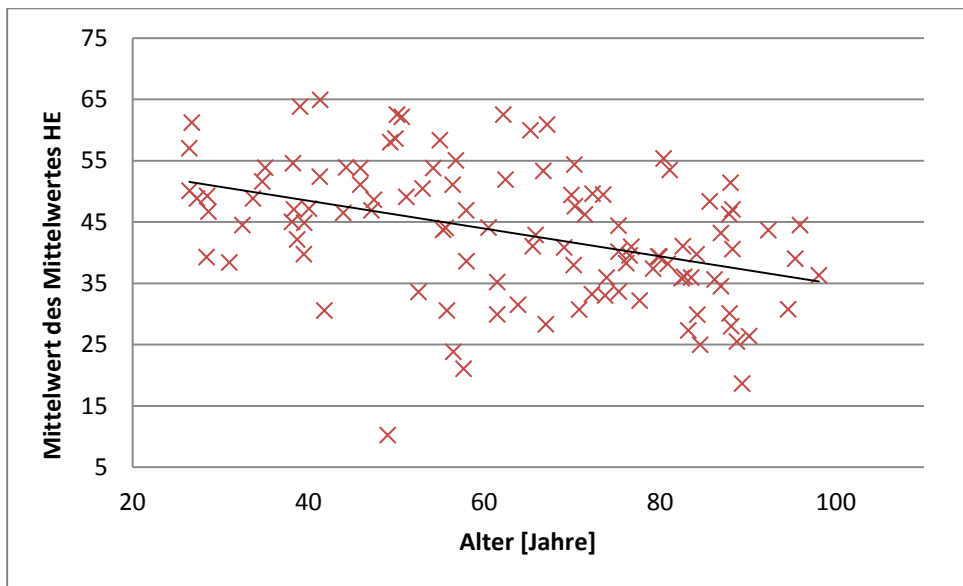
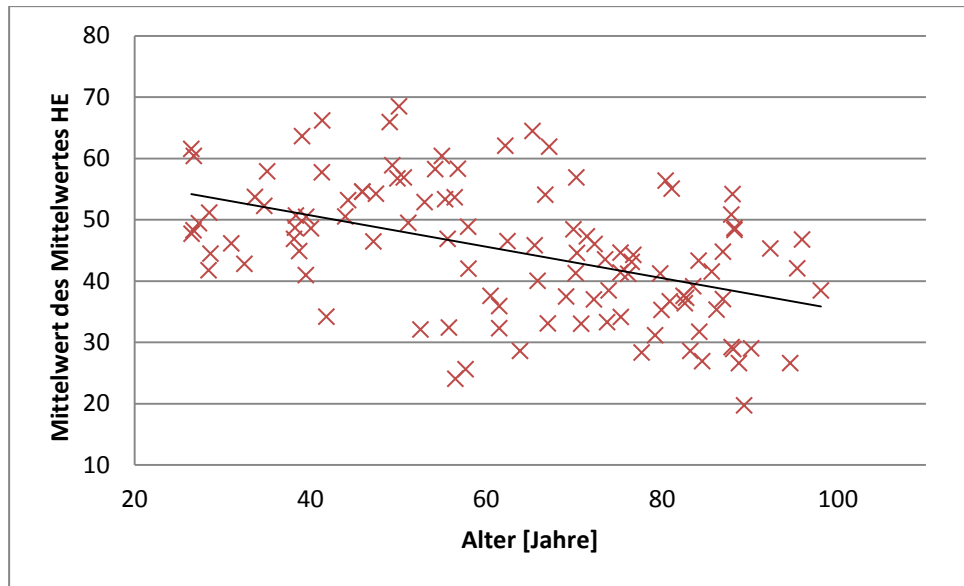


Abbildung 57: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 58: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften**

In den Abbildungen 55 bis 58 ist der Mittelwert des Mittelwertes der HE gegen das Alter der weiblichen Schädelkalotten aufgetragen. Die Abbildungen 55 und 56 zeigen, dass in der Altersgruppe  $< 20$  Jahren zwischen den aufgetragenen Parametern im frontalen und okzipitalen Kalottenbereich eine eindeutige Korrelation besteht. In den Abbildungen 57 und 58 ist eine deutlich negative Korrelation der Parameter für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre zu erkennen. Der Korrelationsquotient beträgt hier für den frontalen Bereich -0,42 und für den okzipitalen Bereich -0,48.

### 3.2.6.2 Mittelwert des Mittelwertes der HE pro Kalottenhälfte für die männlichen Schädelkalotten

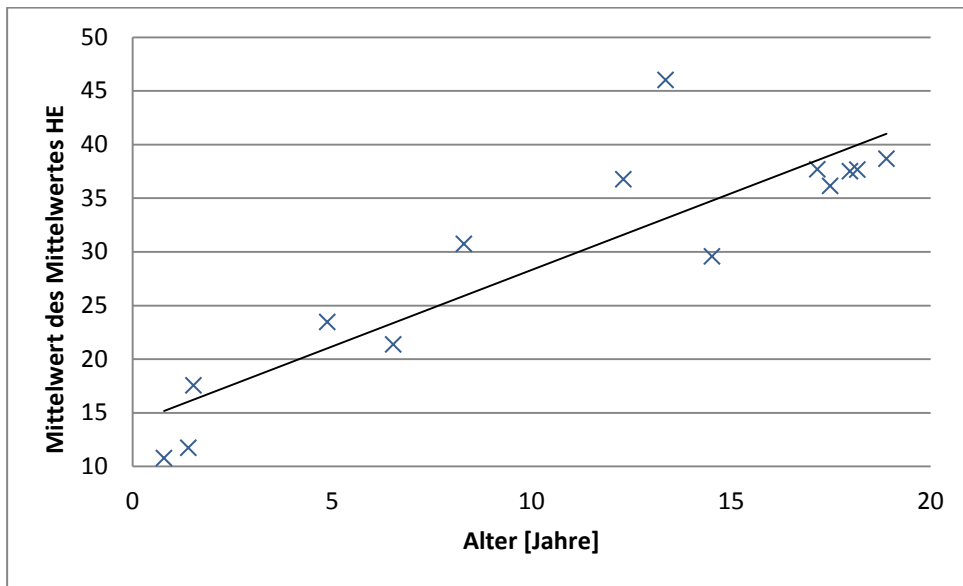


Abbildung 59: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften

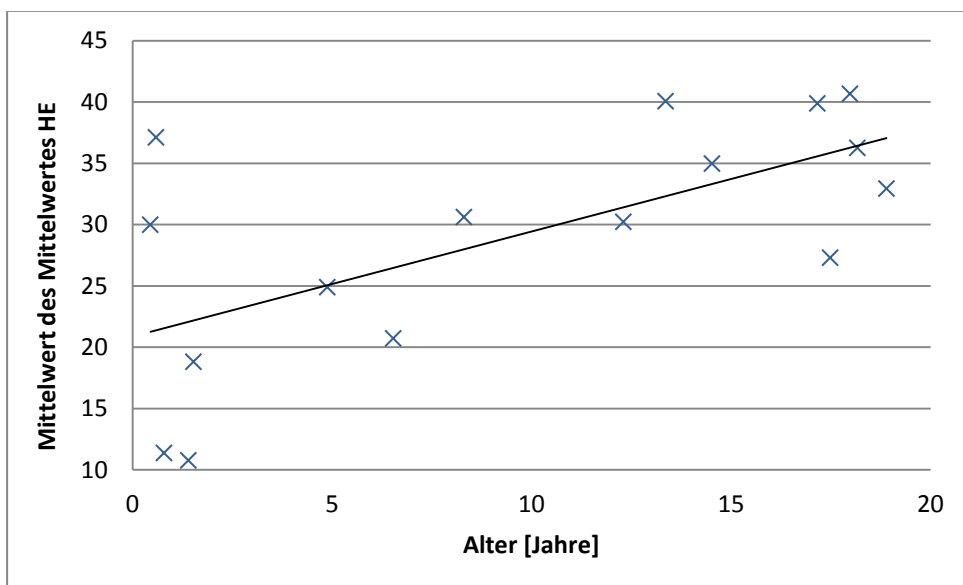


Abbildung 60: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften

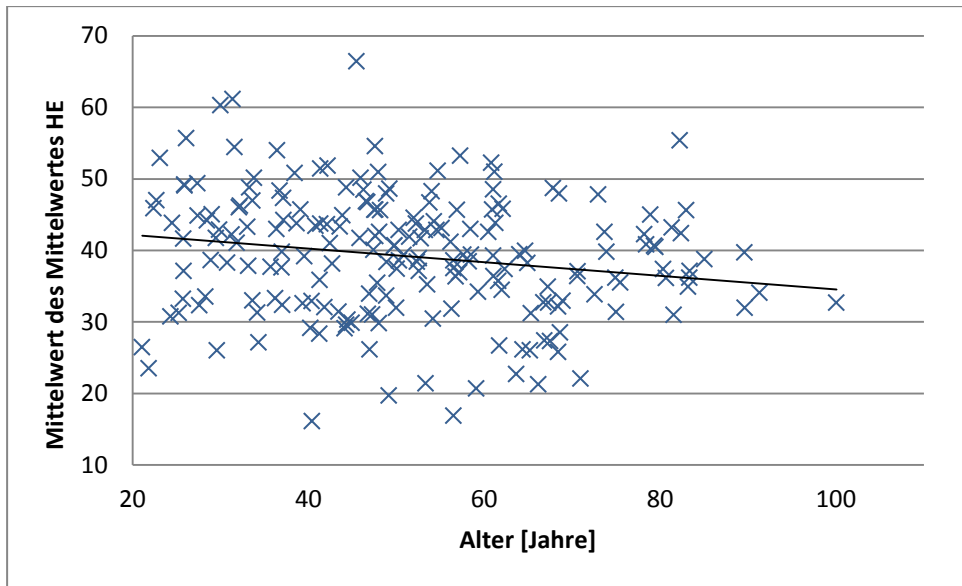


Abbildung 61: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften

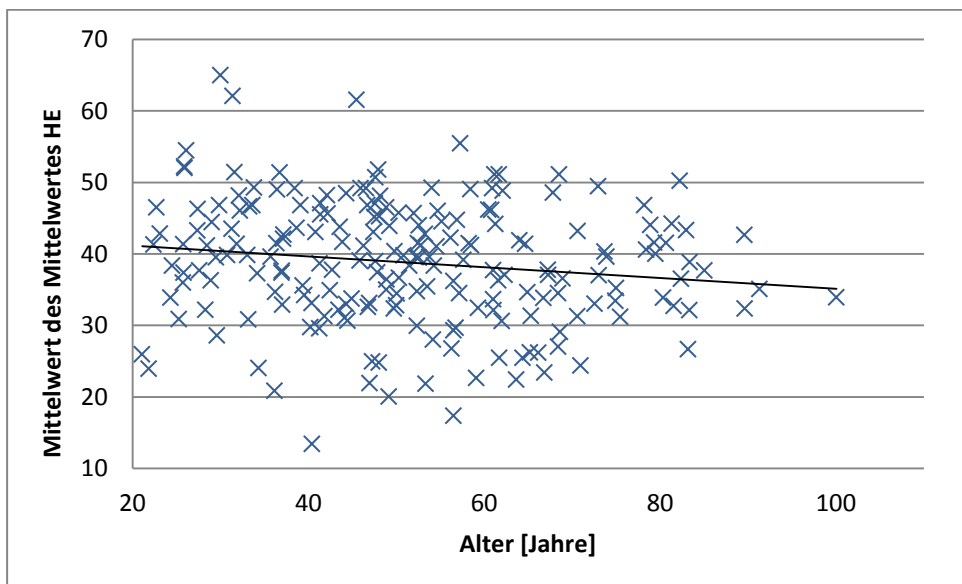


Abbildung 62: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften

Der Zusammenhang des Parameters, Mittelwert des Mittelwertes HE, mit dem Alter der männlichen Schädelkalotten ist in den Abbildungen 59 bis 62 dargestellt. Die Abbildungen 59 und 60 zeigen, dass auch diese Parameter in der Altersgruppe  $< 20$  Jahre positiv miteinander korrelieren. Die männliche Gruppe  $\geq 20$  Jahre zeigt im Gegensatz zur vergleichbaren weiblichen Gruppe nur eine sehr kleine negative Korrelation der untersuchten Parameter.

### 3.2.7 Standardabweichung des Mittelwertes der HE pro Kalottenhälfte

Im folgenden Abschnitt wird die Standardabweichung des in den Liniensegmenten gemessenen Mittelwertes der HE jeder Kalottenhälfte in Abhängigkeit vom Alter dargestellt.

#### 3.2.7.1 Standardabweichung des Mittelwertes der HE pro Kalottenhälfte für die weiblichen Schädelkalotten

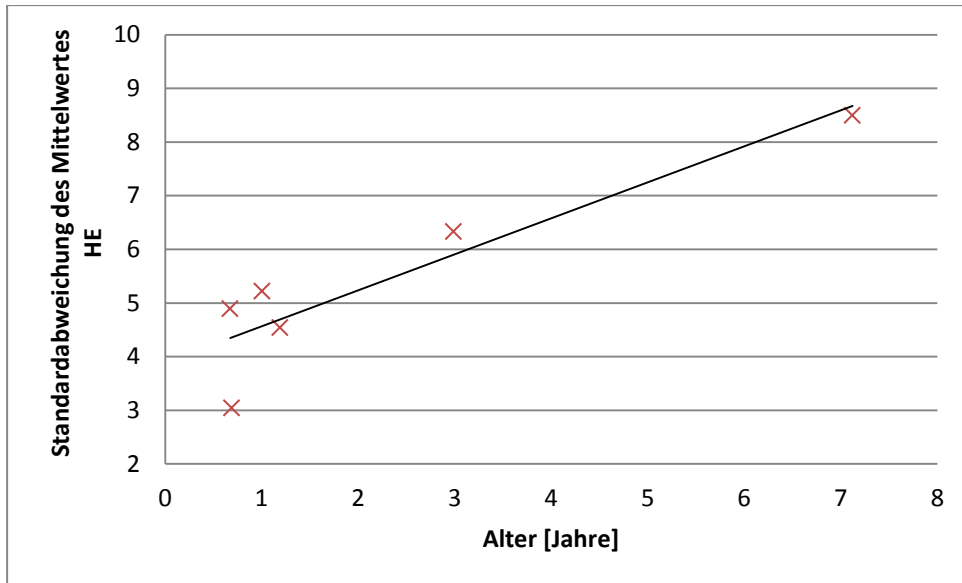


Abbildung 63: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften



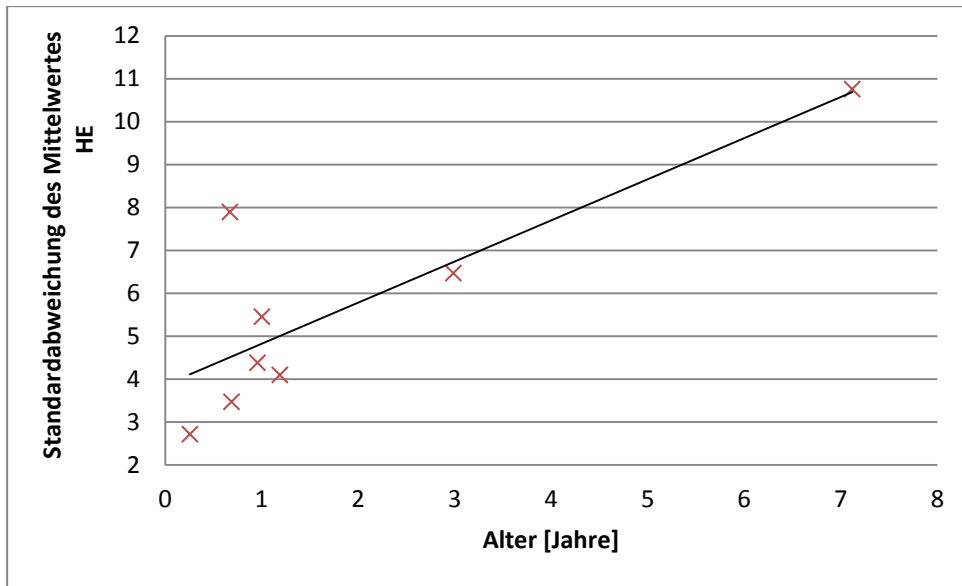


Abbildung 64: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften

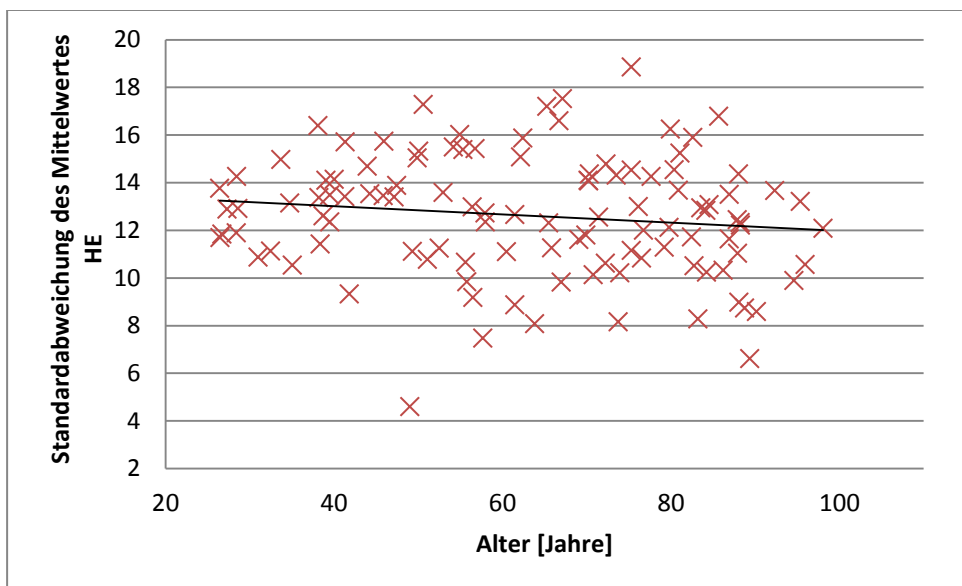
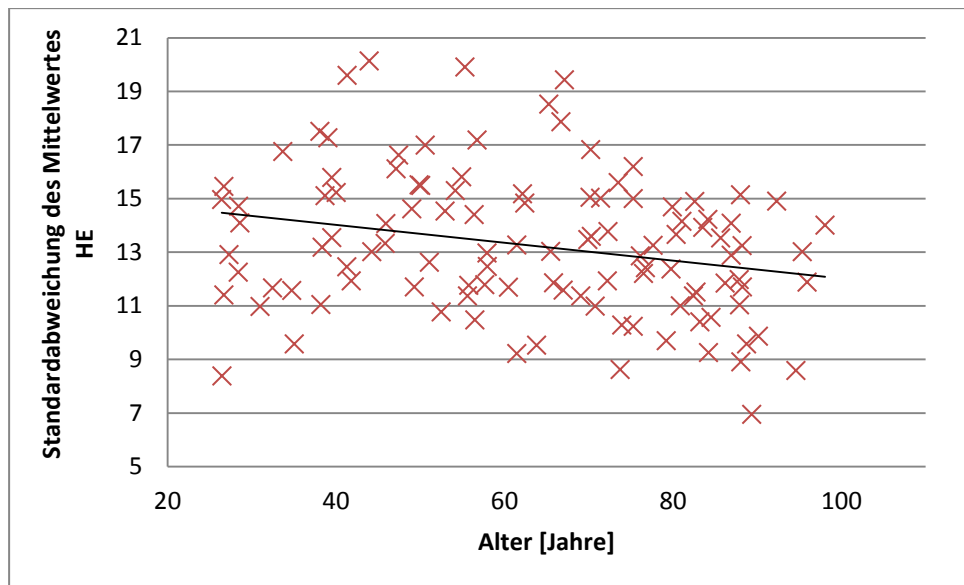


Abbildung 65: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 66:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften

In den Abbildungen 63 bis 66 wird die Korrelation der Standardabweichung des Mittelwertes der HE der weiblichen Schädelkalotten in Abhängigkeit zum Alter dargestellt. Die positive Korrelation dieser Parameter in der Altersgruppe  $< 20$  Jahren ist in den Abbildungen 63 und 64 sowohl für die frontalen als auch für die okzipitalen Kalottenhälften zu erkennen. In den Abbildungen 65 und 66 wird deutlich, dass die Standardabweichung des Mittelwertes der HE in der Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre zwar in der frontalen Region etwas stärker als in der okzipitalen Region, jedoch relativ gesehen, nur sehr gering mit dem Alter korreliert.

### 3.2.7.2 Standardabweichung des Mittelwertes der HE pro Kalottenhälfte für die männlichen Schädelkalotten

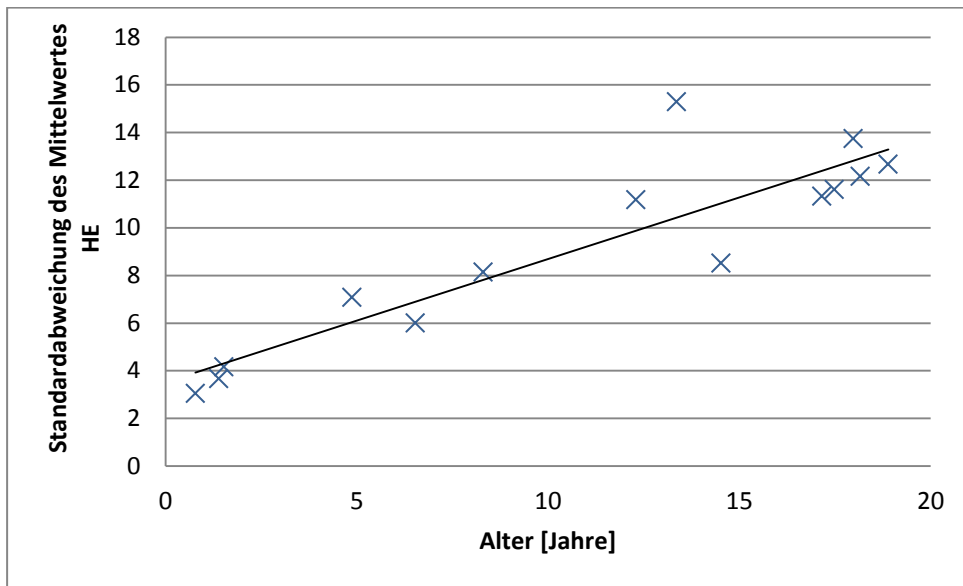


Abbildung 67: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften

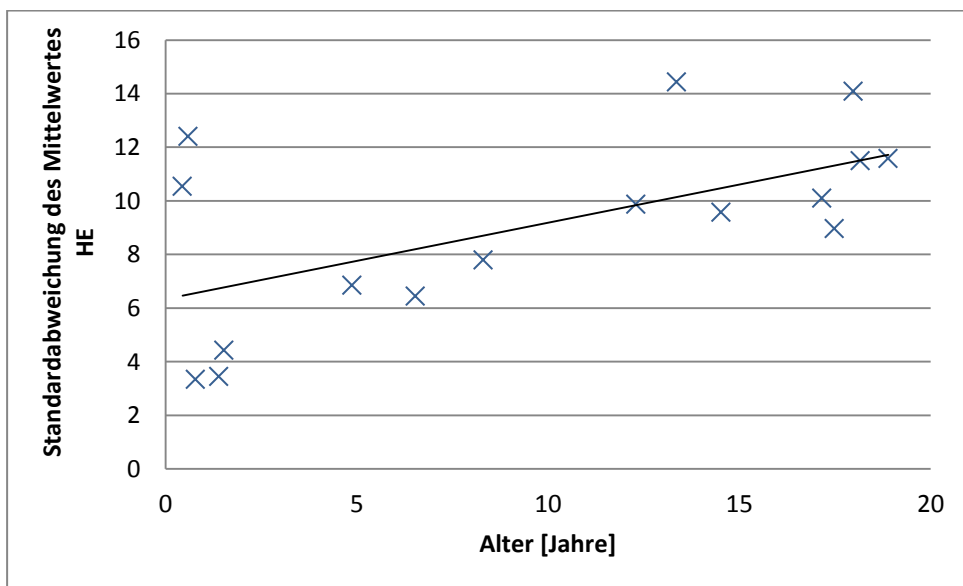
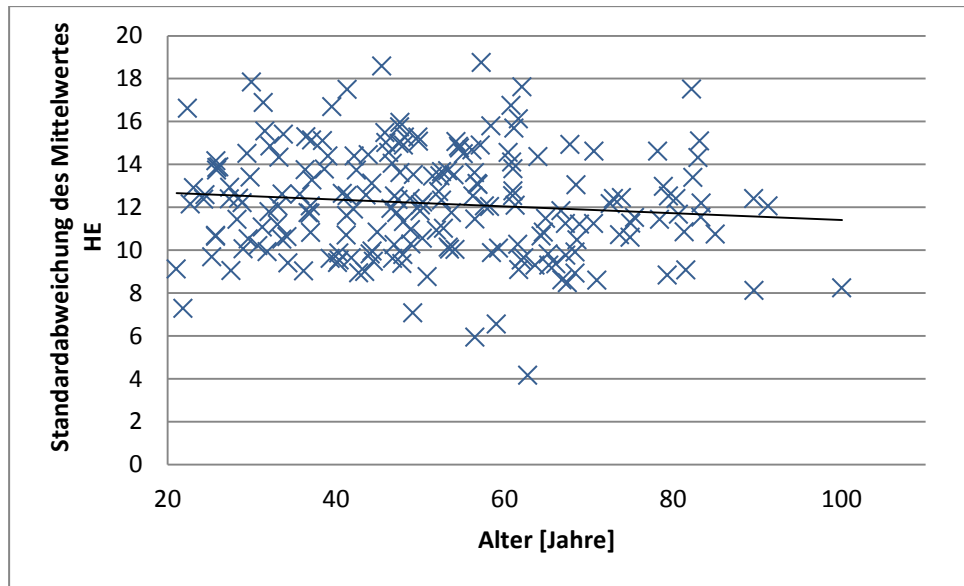
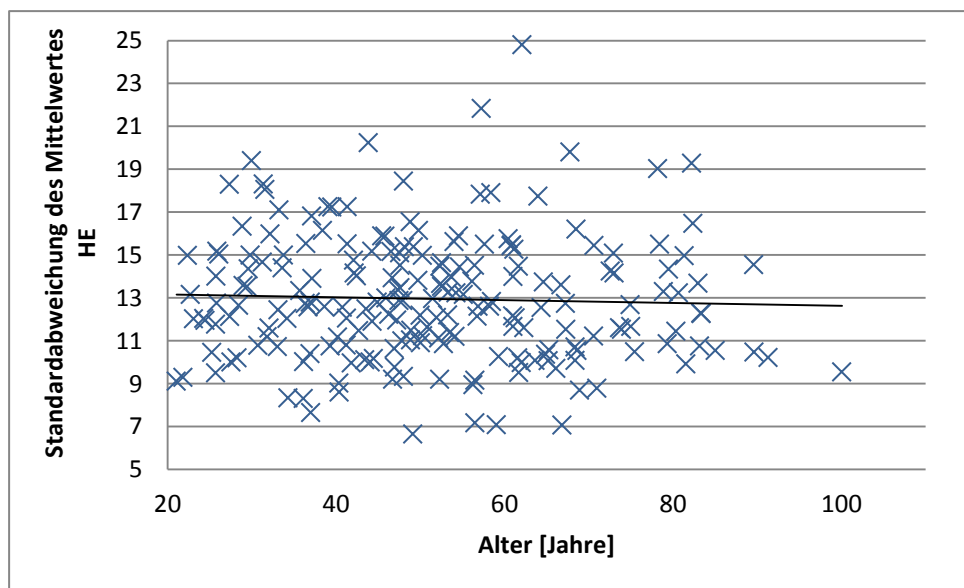


Abbildung 68: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften



**Abbildung 69:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 70:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften

Die Standardabweichung des Mittelwertes HE der männlichen Kalotten ist in den Abbildungen 67 bis 70 gegen das Alter aufgetragen. Abbildung 67 und 68 stellen hierbei die Parameter in Bezug auf die Altersgruppe  $< 20$  Jahre dar. Hier wird wiederum eine positive Korrelation der Parameter im frontalen und okzipitalen Bereich deutlich. Die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre wird in den Abbildungen 69 und 70 dargestellt. Dort ist zu er-

kennen, dass die Standardabweichung des Mittelwertes der HE nur gering mit dem Alter korreliert.

### 3.2.8 Mittelwert der Standardabweichung der HE pro Kalottenhälfte

Dieser Mittelwert für jede Kalottenhälfte bezieht sich auf die Werte der Standardabweichung, die in den jeweiligen Liniensegmenten der untersuchten Kalottenhälften hinsichtlich der Housfield -Einheiten gemessen wurde.

#### 3.2.8.1 Mittelwert der Standardabweichung der HE pro Kalottenhälfte für die weiblichen Schädelkalotten

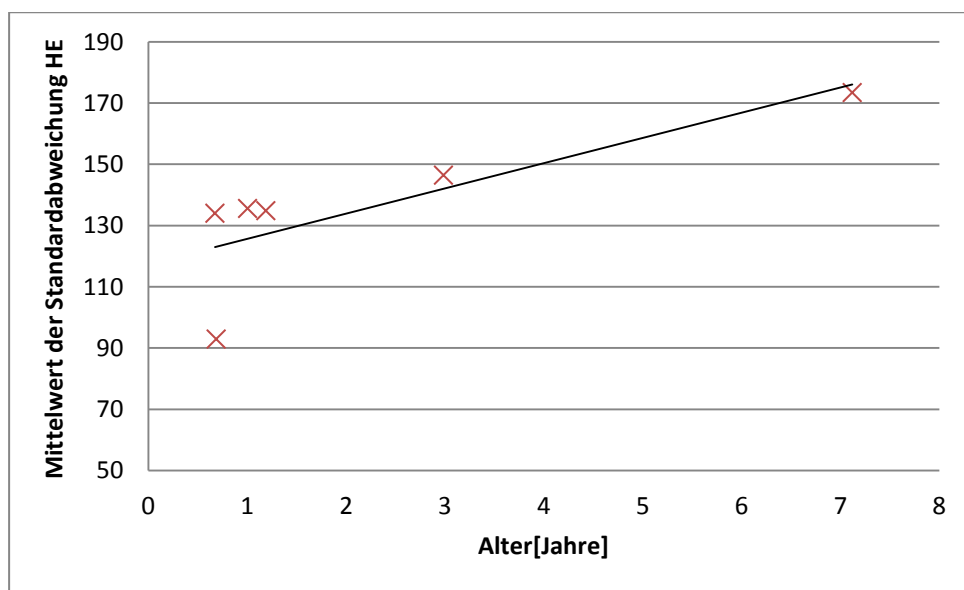


Abbildung 71: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften

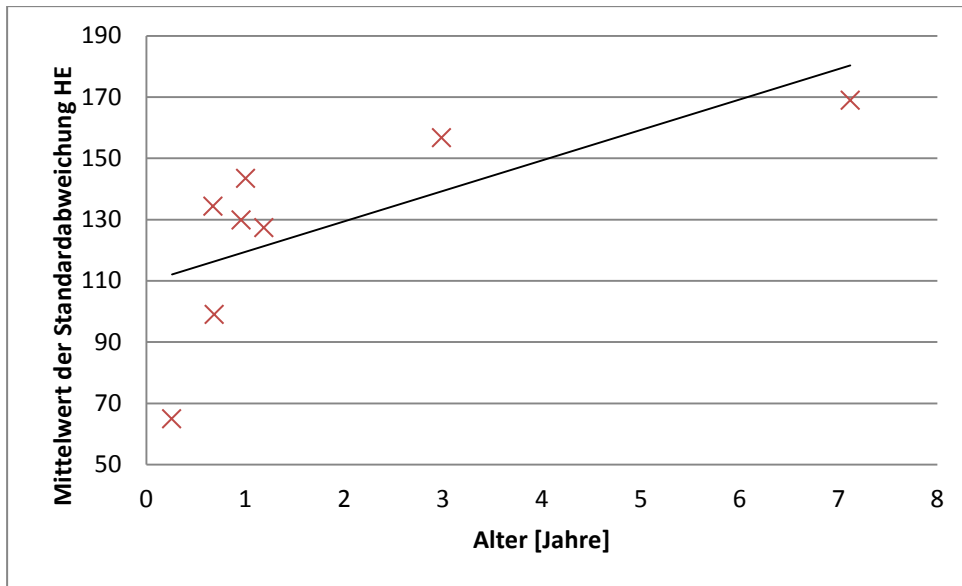


Abbildung 72: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften

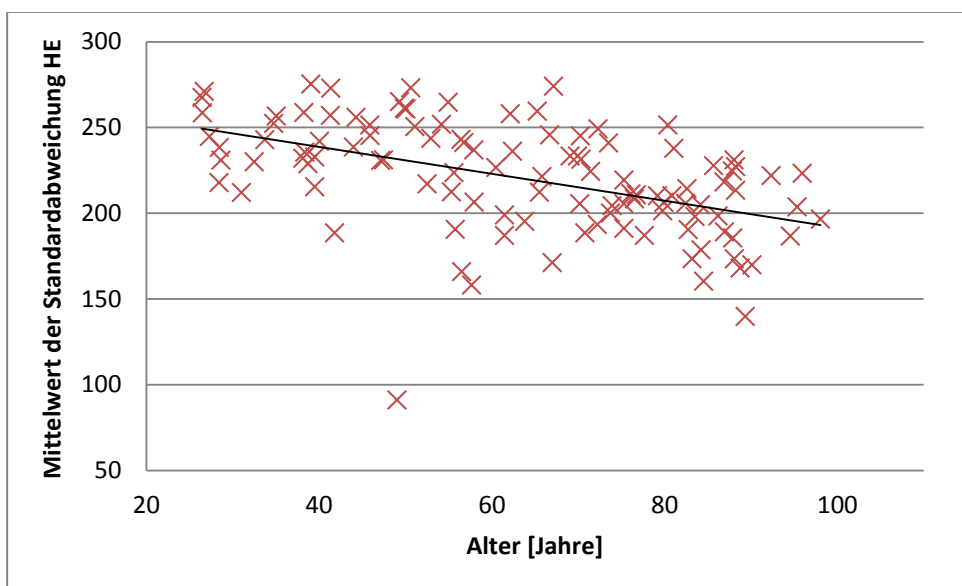
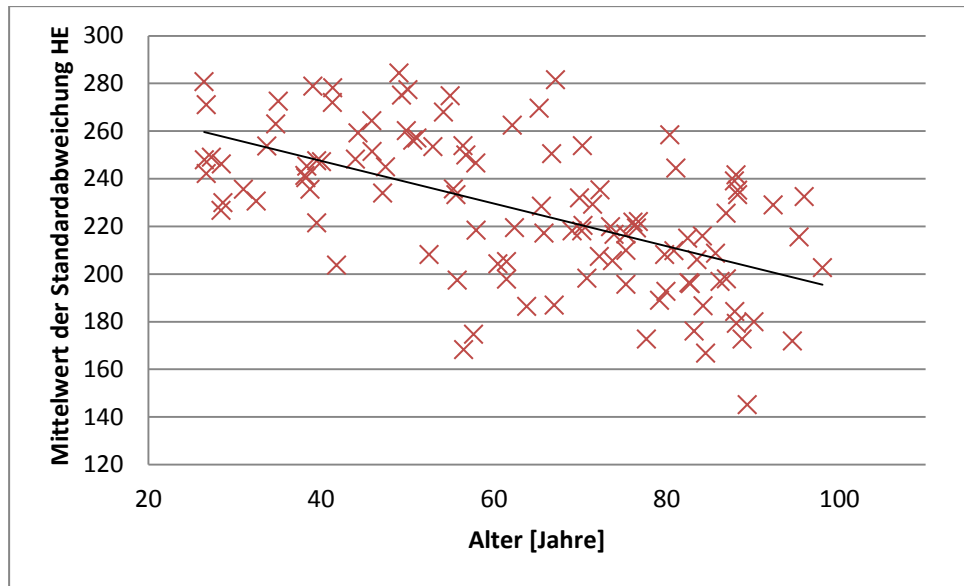


Abbildung 73: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe ≥20 Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 74: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften**

In den Abbildungen 71 bis 74 ist die Korrelation des Mittelwertes der Standardabweichung der HE für die weiblichen Schädelkalotten mit dem Alter dargestellt. In den Abbildungen 71 und 72 wird ein positiver Zusammenhang in beiden Kalottenbereichen deutlich. In der Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre ist eine relativ stark negative Korrelation zu erkennen (Abbildung 73 und 74). Der Korrelationskoeffizient beträgt hier für den frontalen Bereich -0,49 und für den okzipitalen Bereich -0,58 (siehe Tabelle 3).

### 3.2.8.2 Mittelwert der Standardabweichung der HE pro Kalottenhälfte für die männlichen Schädelkalotten

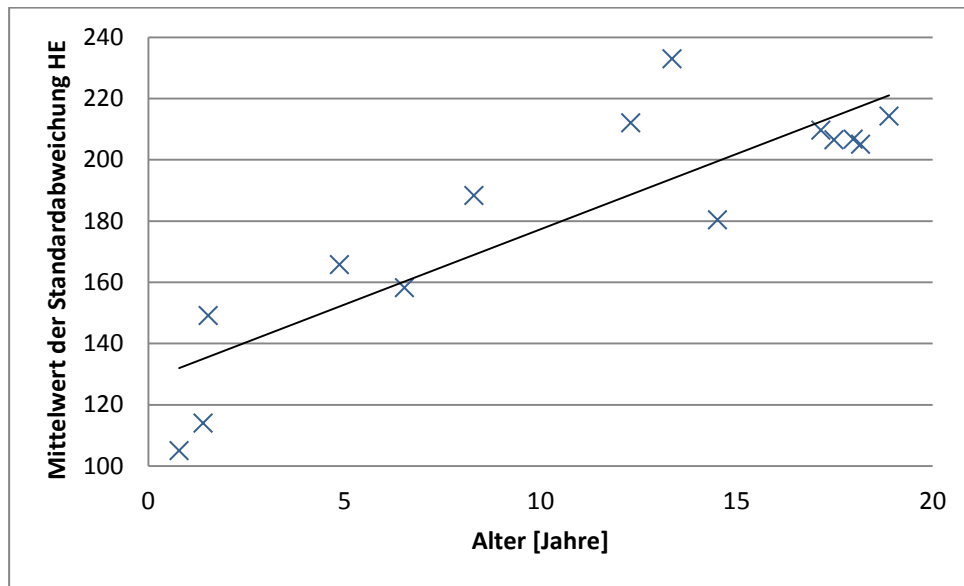


Abbildung 75: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften

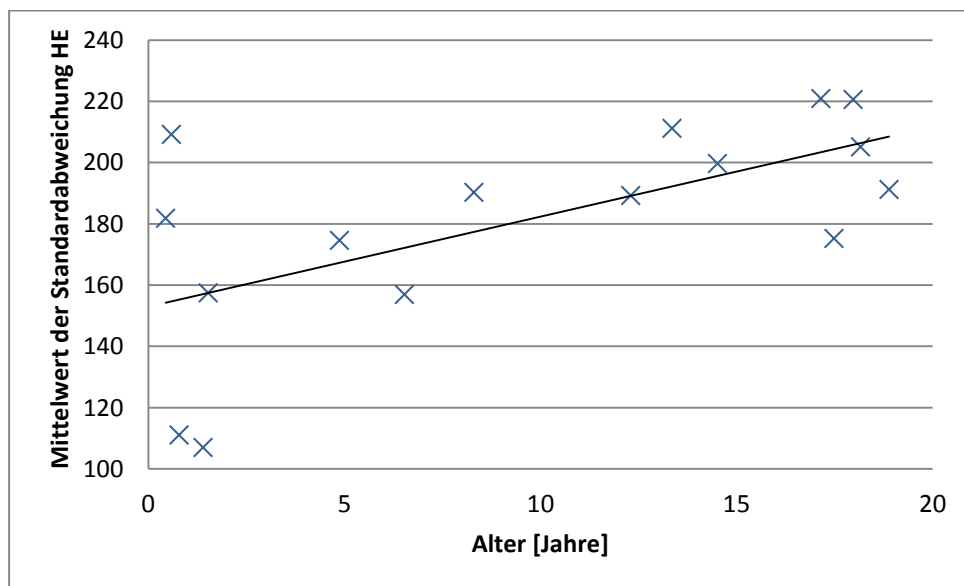


Abbildung 76: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften



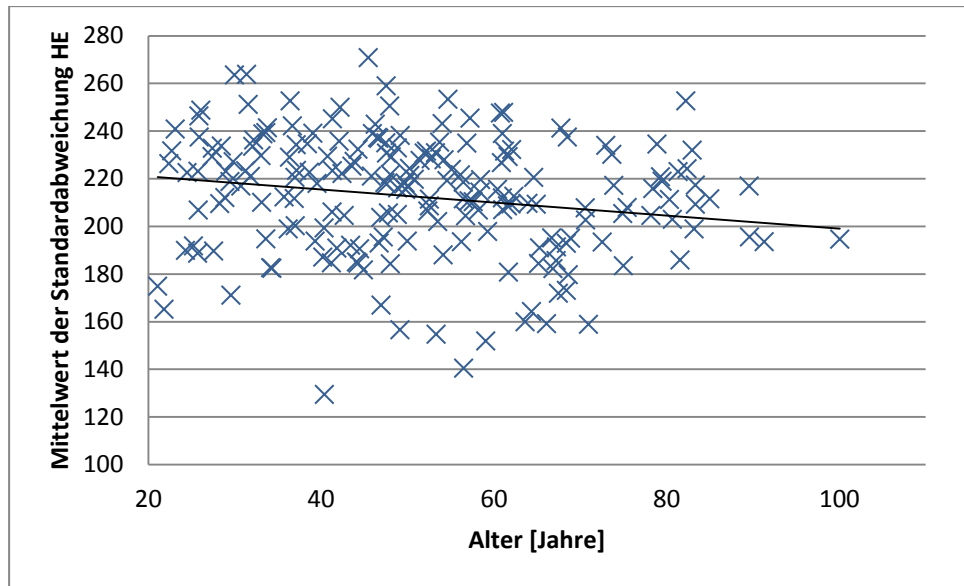


Abbildung 77: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften

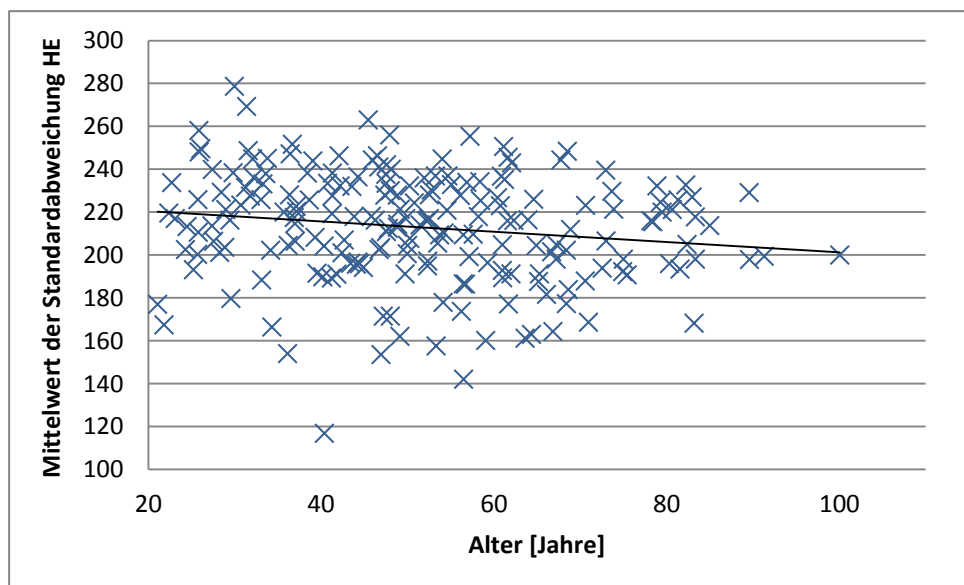


Abbildung 78: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften

Die Korrelationsdiagramme in den Abbildungen 75 bis 78 stellen den Zusammenhang des Mittelwertes der Standardabweichung der HE für die männlichen Schädelkalotten dar. Die Diagramme der Abbildungen 75 und 76 stellen die positive Korrelation der Parameter für beide Kalottenbereiche in der Altersgruppe  $< 20$  Jahre dar. In den Abbildungen 77 und 78 wird deutlich, dass in der männlichen Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre im Ge-

gensatz zur weiblichen älteren Altersgruppe ein sehr geringer negativer Zusammenhang der Parameter im frontalen und okzipitalen Kalottenbereich besteht.

### 3.2.9 Standardabweichung der Standardabweichung der HE pro Kalottenhälfte

In diesem Analyseschritt wird die Standardabweichung bezogen auf eine Kalottenhälfte der in den verschiedenen Liniensegmenten gemessenen Standardabweichungen der jeweiligen Houdsfield-Einheiten untersucht.

#### 3.2.9.1 Standardabweichung der Standardabweichung der HE pro Kalottenhälfte für die weiblichen Schädelkalotten

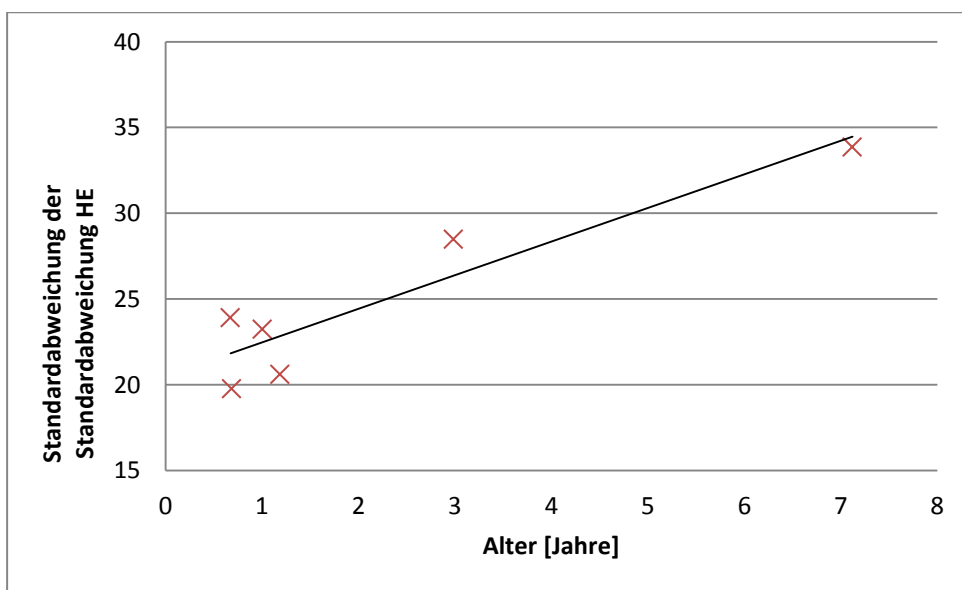


Abbildung 79: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften

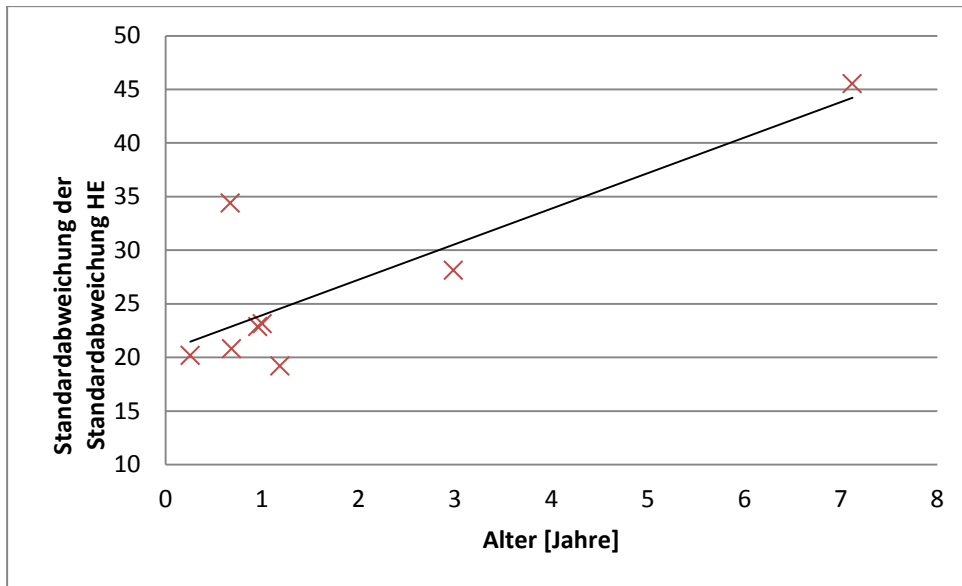


Abbildung 80: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften

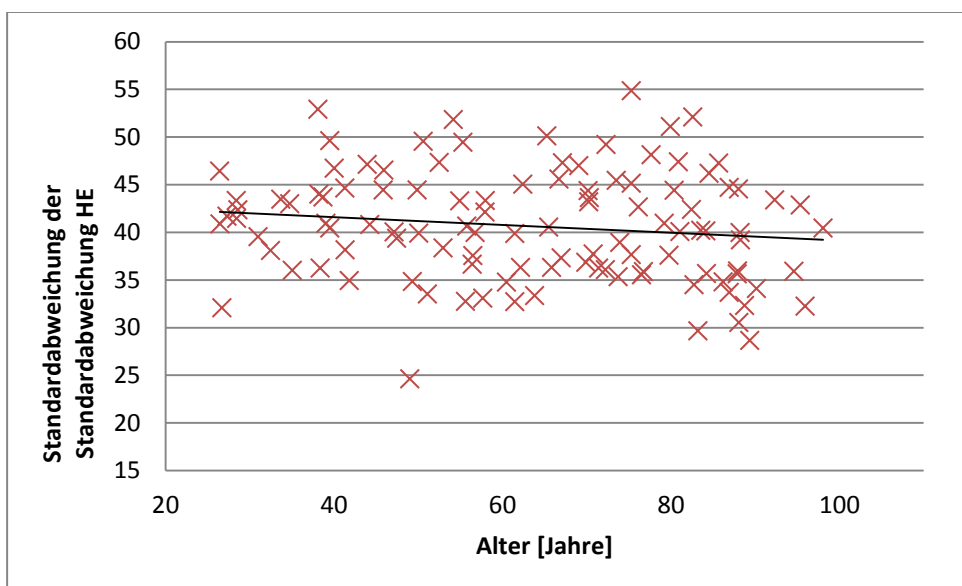
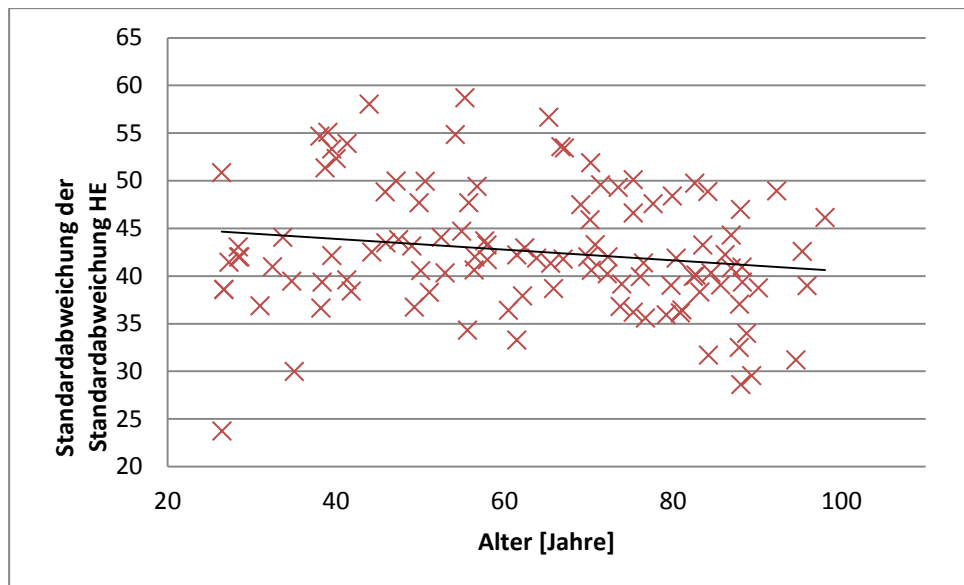


Abbildung 81: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 82: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften**

In den Abbildungen 79 bis 82 wird die Abhängigkeit der Standardabweichung der Standardabweichung der HE vom Alter der weiblichen Schädelkalotten dargestellt. In den Abbildungen 79 und 80 ist die Altersgruppe  $< 20$  Jahre dargestellt. Hier ist eine positive Korrelation sowohl im frontalen als auch im okzipitalen Kalottenbereich zu erkennen. In den Abbildungen 81 und 82 ist die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre dargestellt. Hier ist sowohl im frontalen als auch im okzipitalen Bereich der Kalotten eine sehr gering negative Korrelation der Standardabweichung der Standardabweichung der HE für beide Kalottenbereiche zu erkennen.

### 3.2.9.2 Standardabweichung der Standardabweichung der HE pro Kalottenhälfte für die männlichen Schädelkalotten

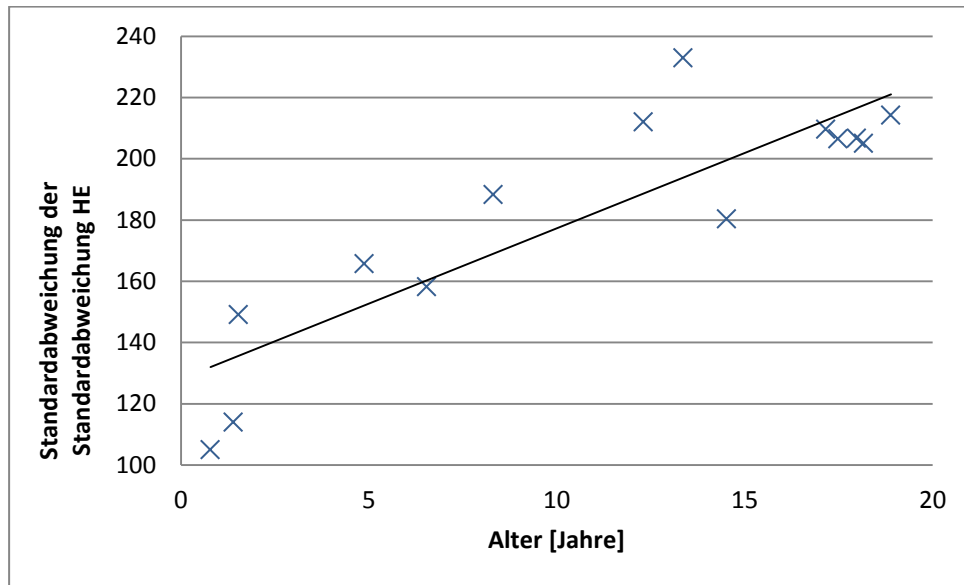


Abbildung 83: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften

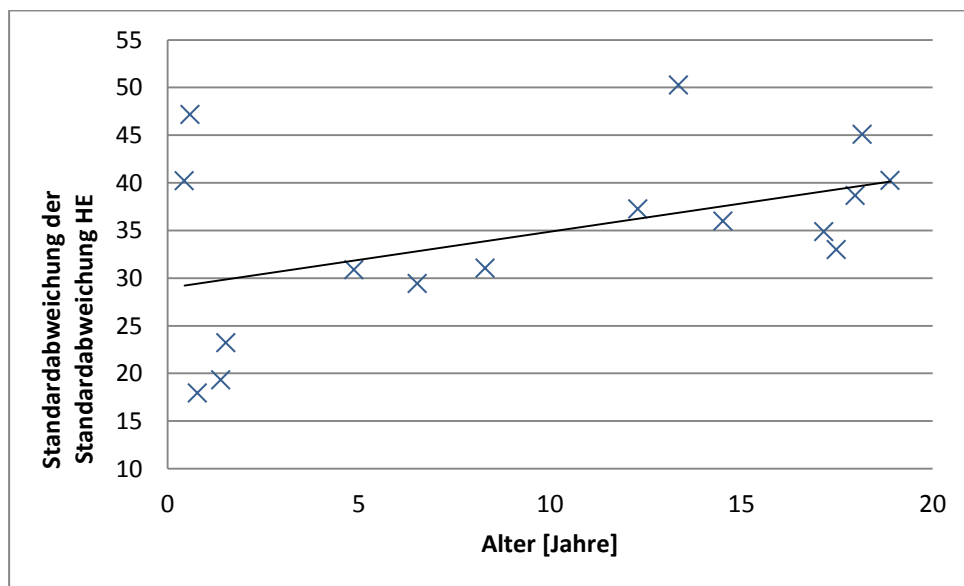
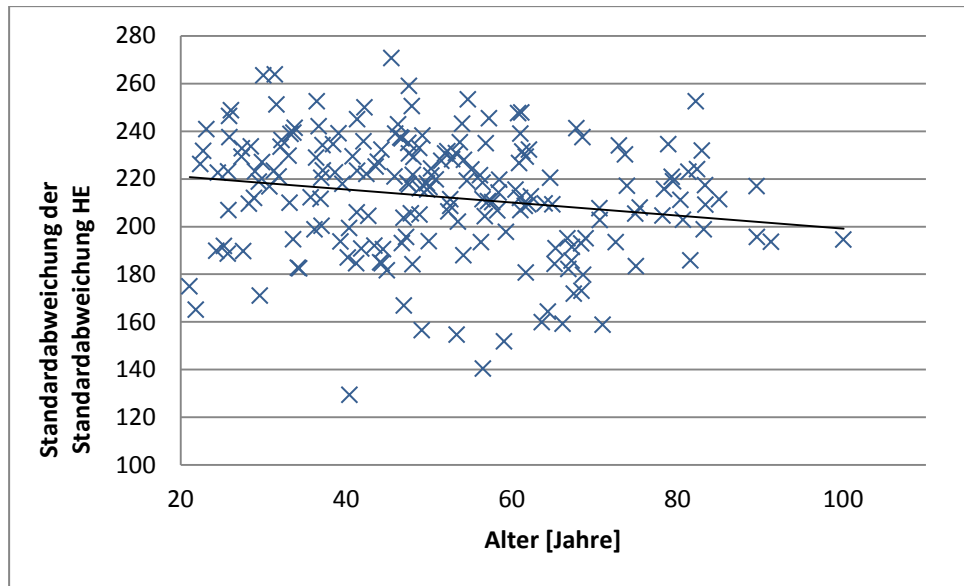
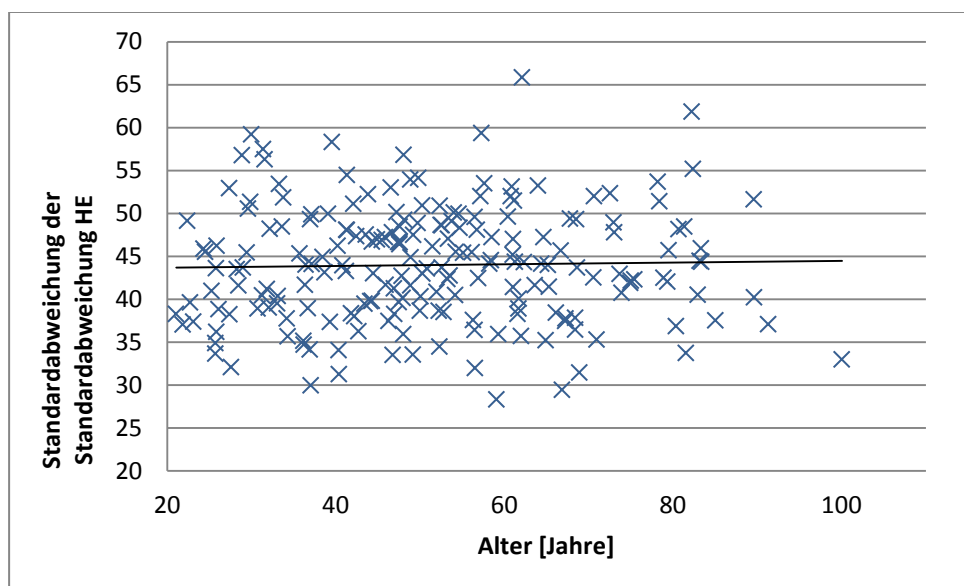


Abbildung 84: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften



**Abbildung 85:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälften



**Abbildung 86:** Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften

In den Abbildungen 83 bis 86 ist die Korrelation der oben erwähnten Parameter für die männlichen Schädelkalotten dargestellt. Die positive Korrelation in der Altersgruppe  $< 20$  Jahre ist im okzipitalen Kalottenbereich wesentlich kleiner als im frontalen Kalottenbereich (Abbildung 83 und 84). Im Altersbereich  $\geq 20$  Jahre ist in beiden Kalottenbe-

reichen keine Korrelation der untersuchten Parameter zu erkennen (Abbildung 85 und 86).

### 3.3 Korrelationsuntersuchung der verschiedenen Funktionen

In den folgenden Tabellen soll nach Geschlecht getrennt ein Überblick zu den Korrelationskoeffizienten  $r$  der untersuchten Funktionen gegeben werden.

#### 3.3.1 Weibliche und männliche Kalotten

Untersuchte Funktion	Untersuchtes Kollektiv	$r$ , ♀	$r$ , ♂
„Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“	<20Jahre, frontal	0,81	0,82
„Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“	<20Jahre, okzipital	0,77	0,57
„Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“	≥20 Jahre, frontal	-0,24	-0,14
„Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“	≥20 Jahre, okzipital	-0,30	-0,13
„Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“	<20Jahre, frontal	0,94	0,86
„Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“	<20Jahre, okzipital	0,88	0,37
„Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“	≥20 Jahre, frontal	0,10	-0,11
„Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“	≥20 Jahre, okzipital	0,30	-0,18
„relative (prozentuale) Standardabweichung“ versus „Alter“	alle Altersbereiche, frontal	0,33	0,13
„relative (prozentuale) Standardabweichung“ versus „Alter“	alle Altersbereiche, okzipital	0,29	0,03
„Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“	<20Jahre, frontal	0,90	0,84
„Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“	<20Jahre, okzipital	0,82	0,63
„Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“	≥20 Jahre, frontal	<b>-0,43</b>	<b>-0,16</b>
„Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“	≥20 Jahre, okzipital	<b>-0,49</b>	<b>-0,14</b>
„Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“	<20Jahre, frontal	0,95	0,85
„Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“	<20Jahre, okzipital	0,91	0,58
„Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“	≥20 Jahre, frontal	-0,16	-0,07

„Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“	≥20 Jahre, okzipital	-0,28	-0,03
„Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“	<20Jahre, frontal	0,84	0,89
„Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“	<20Jahre, okzipital	0,73	0,65
„Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“	≥20 Jahre, frontal	<b>-0,42</b>	<b>-0,18</b>
„Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“	≥20 Jahre, okzipital	<b>-0,48</b>	<b>-0,15</b>
„Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“	<20Jahre, frontal	0,92	0,90
„Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“	<20Jahre, okzipital	0,82	0,60
„Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“	≥20 Jahre, frontal	-0,34	-0,12
„Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“	≥20 Jahre, okzipital	-0,25	-0,04
„Mittelwert der Standardabweichung der HE“	<20Jahre, frontal	0,80	0,87
„Mittelwert der Standardabweichung der HE“	<20Jahre, okzipital	0,69	0,63
„Mittelwert der Standardabweichung der HE“	≥20 Jahre, frontal	<b>-0,49</b>	<b>-0,17</b>
„Mittelwert der Standardabweichung der HE“	≥20 Jahre, okzipital	<b>-0,58</b>	<b>-0,16</b>
„Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“	<20Jahre, frontal	0,93	0,86
„Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“	<20Jahre, okzipital	0,83	0,47
„Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“	≥20 Jahre, frontal	-0,14	0,01
„Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“	≥20 Jahre, okzipital	-0,17	0,03

**Tabelle 3: Ergebnisse der Korrelationsuntersuchung für die weiblichen und männlichen Schädelkalotten**

Sowohl bei den Korrelationskoeffizienten der betrachteten Funktionen des weiblichen als auch des männlichen Untersuchungskollektives ist zu erkennen, dass in der Altersgruppe <20 Jahre immer eine positive Korrelation vorliegt, wobei der Korrelationskoeffizient der frontalen Kalottenhälfte zu allen Funktionen größer ist als der der okzipitalen Kalottenhälfte. In der Altersgruppe ≥20 Jahre ist zu vielen betrachteten Funktionen eine Streuung von  $r \cong 0$  erkennbar. Eindeutige Unterschiede der Korrelationskoeffizienten des weiblichen und des männlichen Untersuchungskollektivs sind in der Altersgruppe



$\geq 20$  Jahre zu folgenden betrachteten Funktionen zu erkennen: „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“, „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ und „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“. In diesen drei betrachteten Funktionen ist der Korrelationskoeffizient beim weiblichen Untersuchungskollektiv deutlich stärker negativ als der des männlichen Untersuchungskollektivs (siehe Tabelle 3).

Die Normalverteilung der Werte wurde durch dem Shapiro-Wilk Test mit dem Vergleich von „ $W_{\text{berechnet}}$ “ und „ $W_{\text{kritisch}}$ “ überprüft. Hierzu wurden nur die beobachteten Parameter überprüft, welche keine Daten aus dem Kollektiv  $< 20$  Jahre enthalten, da aufgrund der kleinen Anzahl an Werten in dem Kollektiv  $< 20$  Jahre mithilfe des Shapiro-Wilk Tests keine wertvolle Aussage getroffen werden kann. Wenn „ $W_{\text{berechnet}}$ “ größer ist als „ $W_{\text{kritisch}}$ “ kann nach der  $H_0$  Hypothese des Tests eine Normalverteilung angenommen werden. Die Berechnung wurde bei einem Signifikanzlevel von 0,05 ausgeführt. Bei 37 von 38 Verteilungen des Kollektivs  $\geq 20$  Jahre ergab die Auswertung der vollständigen Daten für  $W_{\text{berechnet}}$  einen größeren Wert als für „ $W_{\text{kritisch}}$ “. Bei der Berechnungen in Bezug auf den „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ des männlichen Kollektivs  $\geq 20$  Jahre, frontal, war  $W_{\text{berechnet}}$  erst dann größer als  $W_{\text{kritisch}}$ , nachdem ein einzelner Ausreißer-Wert von insgesamt 204 Datenpunkten entfernt wurde. Daher wurde davon ausgegangen, dass alle Gruppen des Kollektivs  $< 20$  Jahre einer Normalverteilung folgen.

### 3.4 Histogramme zur Dickenverteilung, Beispiele

Die folgenden Histogramme stellen die Verteilung der Kalottendicke in jeweils einer Kalottenhälfte dar. Die verschieden hohen Balken zeigen jeweils an, in wie vielen Liniensegmenten einer Kalotte die jeweilige Dicke gemessen wurde. Die Auswahl der Histogramme erfolgte hier zufällig. Wie bei der Betrachtung der Histogramme aller untersuchten Schädelkalotten, ist auch bei der Betrachtung dieser zufälligen Auswahl die individuelle Ausprägung der verschiedenen Histogramme zu erkennen.

### 3.4.1 Histogramme der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe < 20 Jahre, frontale Kalottenhälften

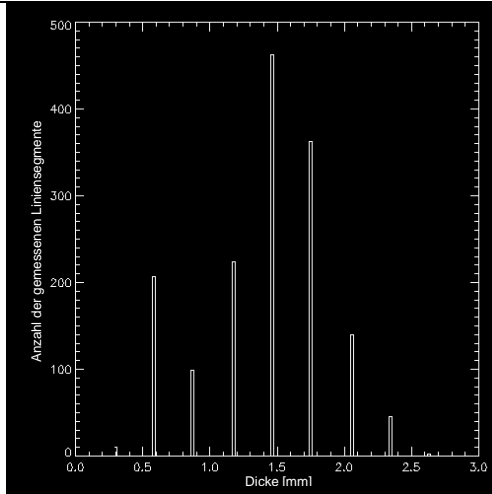


Abbildung 87: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 1

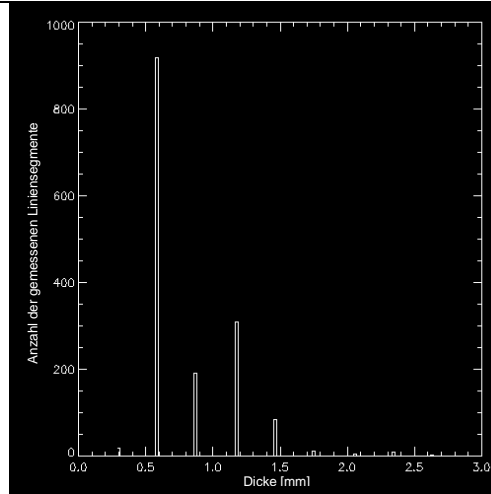


Abbildung 88: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 2

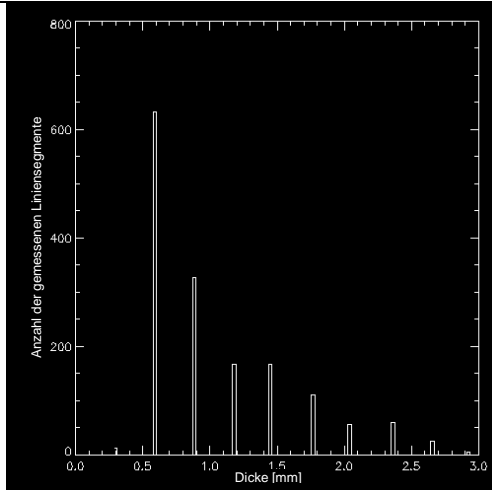


Abbildung 89: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 3

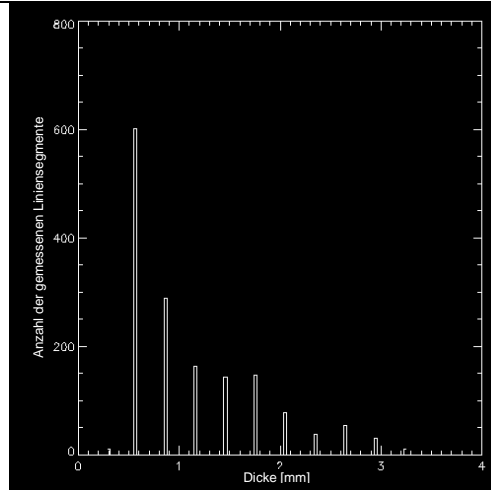


Abbildung 90: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 4

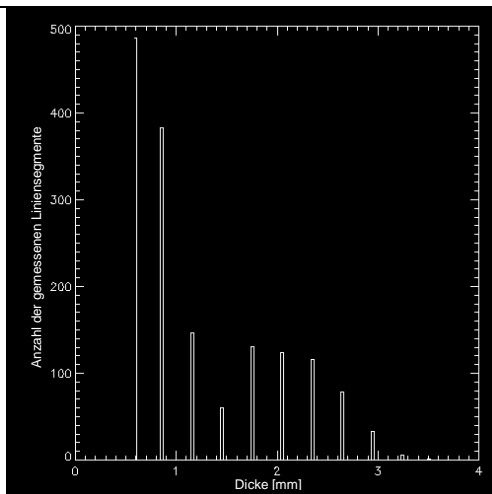


Abbildung 91: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 5

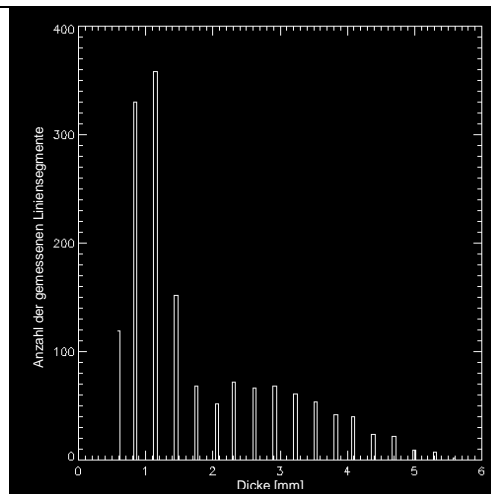


Abbildung 92: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 6

### 3.4.2 Histogramme der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe < 20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften

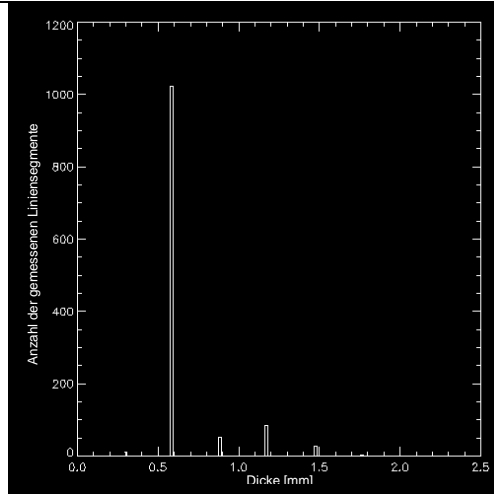


Abbildung 93: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 1

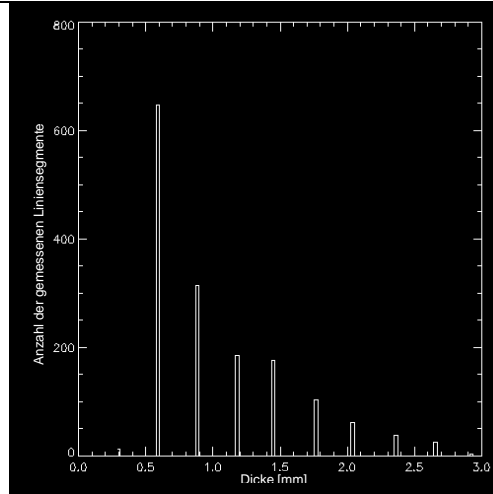


Abbildung 94: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 2

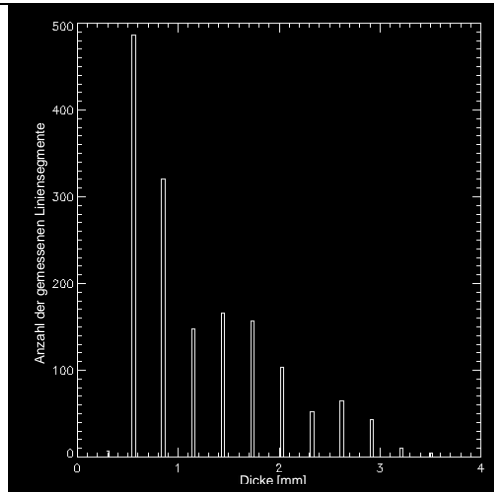


Abbildung 95: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 3

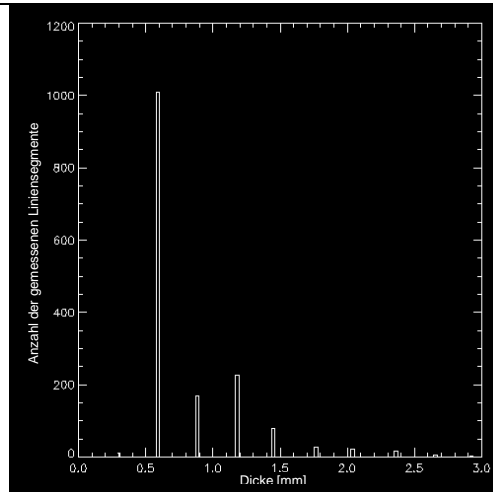


Abbildung 96: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 4

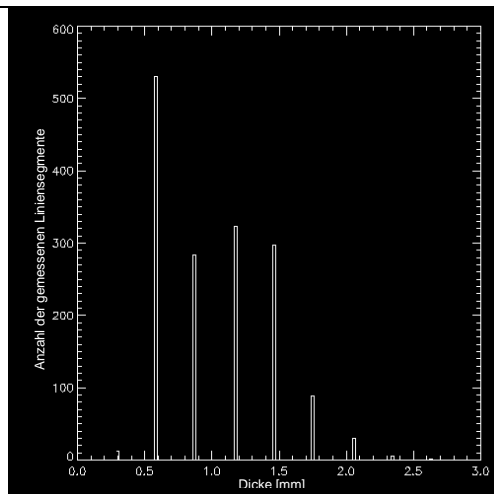


Abbildung 97: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 5

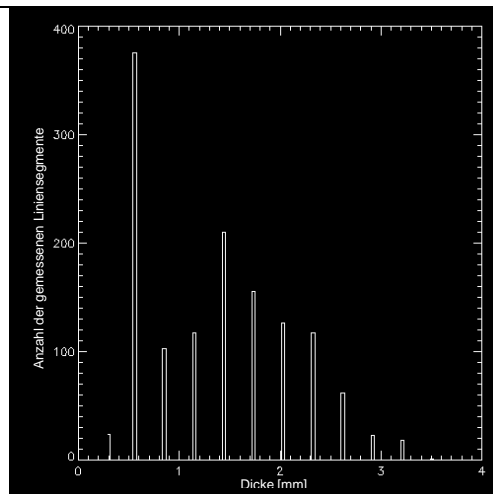


Abbildung 98: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 6

### 3.4.3 Histogramme der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften

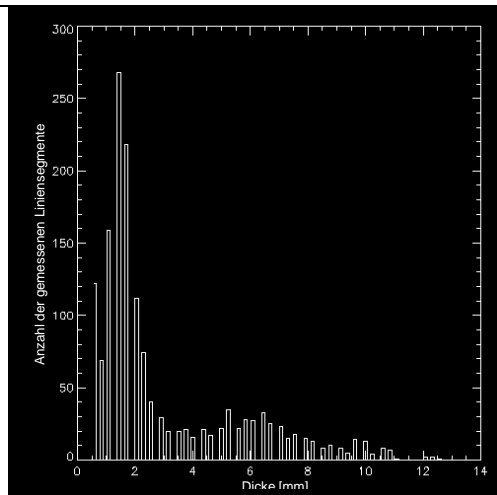


Abbildung 99: Dickenverteilung, weiblich,  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 1

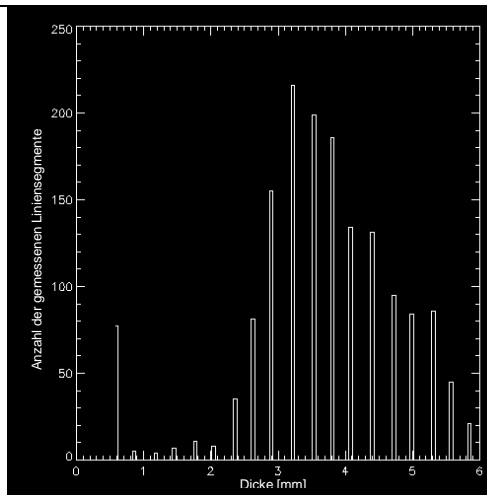


Abbildung 100: Dickenverteilung, weiblich,  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 2

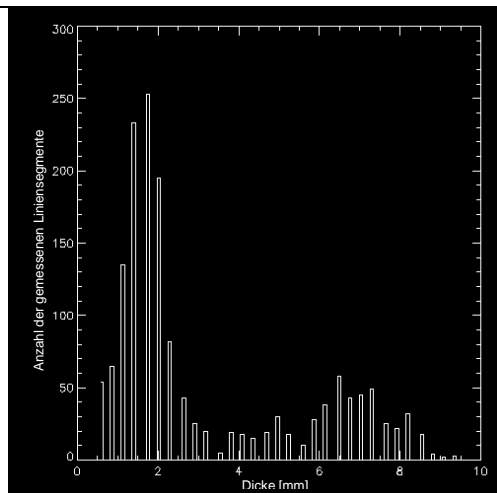


Abbildung 101: Dickenverteilung, weiblich,  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 3

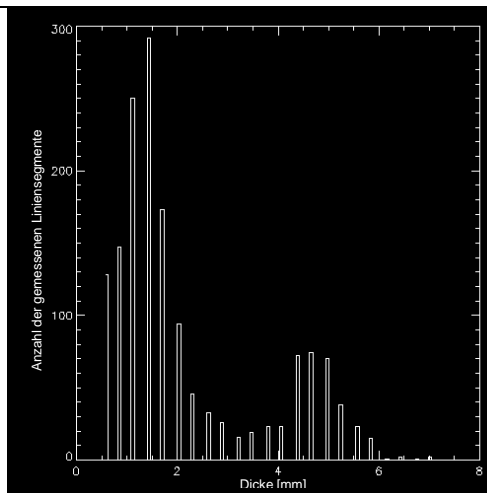


Abbildung 102: Dickenverteilung, weiblich,  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 4

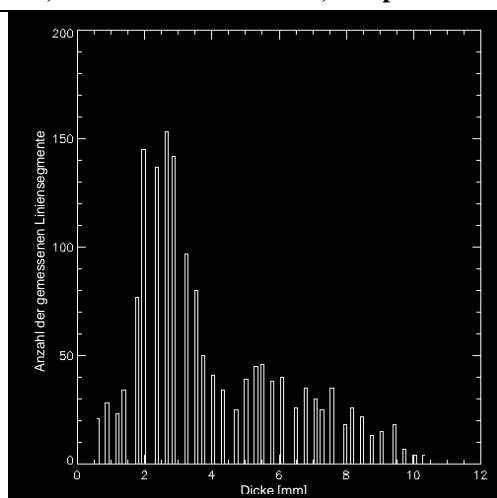


Abbildung 103: Dickenverteilung, weiblich,  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 5

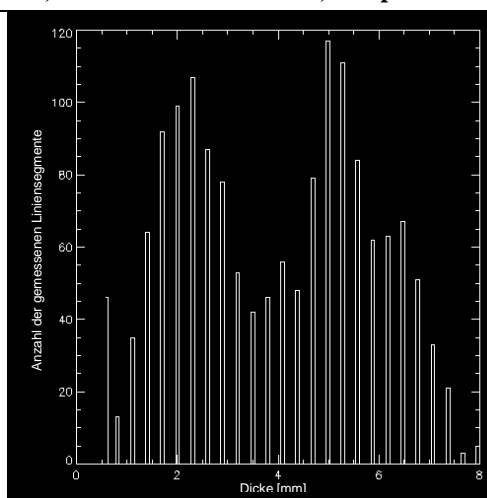


Abbildung 104: Dickenverteilung, weiblich,  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 6

### 3.4.4 Histogramme der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften

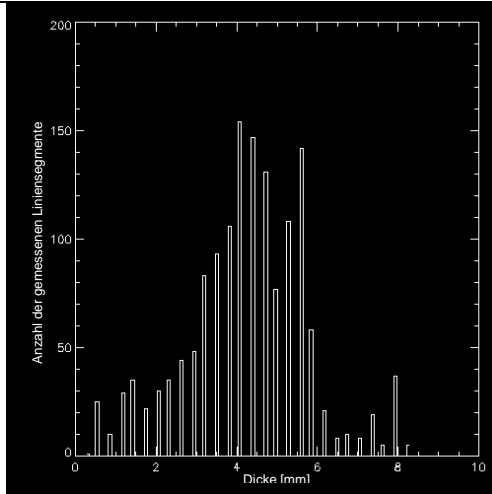


Abbildung 105: Dickenverteilung, weiblich,  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 1

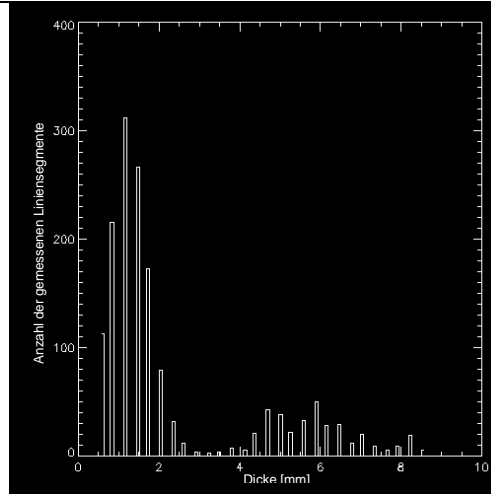


Abbildung 106: Dickenverteilung, weiblich,  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 2

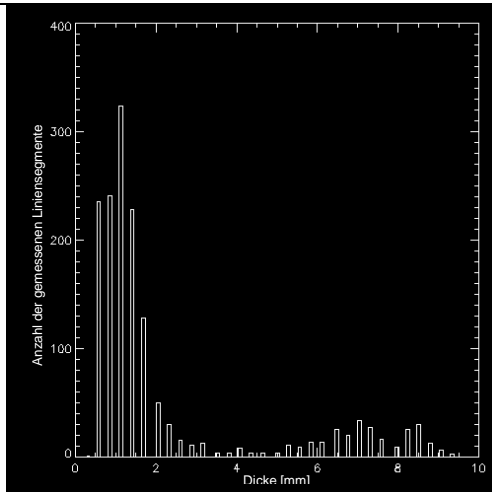


Abbildung 107: Dickenverteilung, weiblich,  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 3

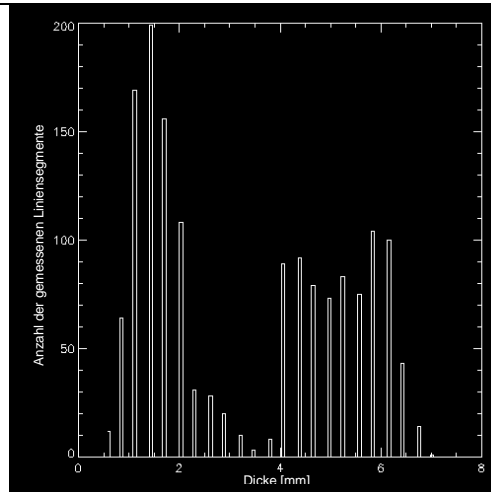


Abbildung 108: Dickenverteilung, weiblich,  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 4

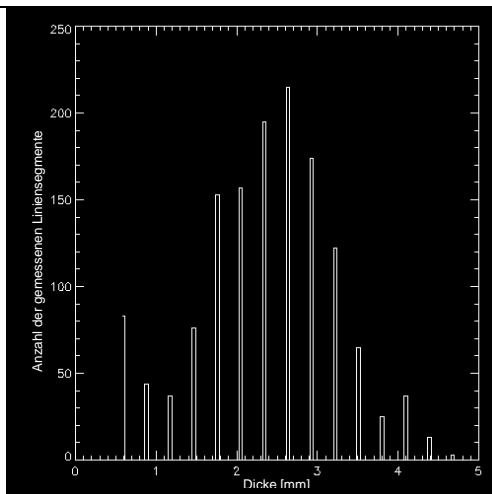


Abbildung 109: Dickenverteilung, weiblich,  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 5

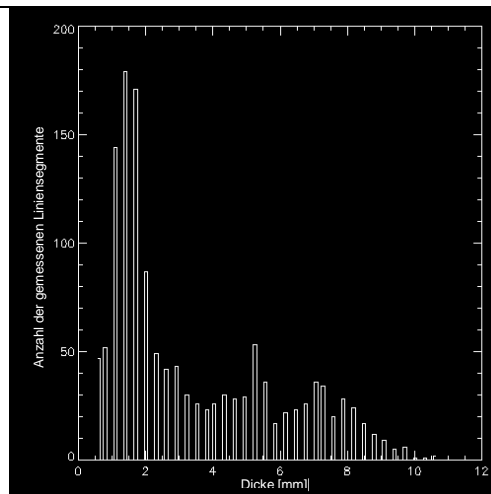


Abbildung 110: Dickenverteilung, weiblich,  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 6

### 3.4.5 Histogramme der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe < 20 Jahre, frontale Kalottenhälften

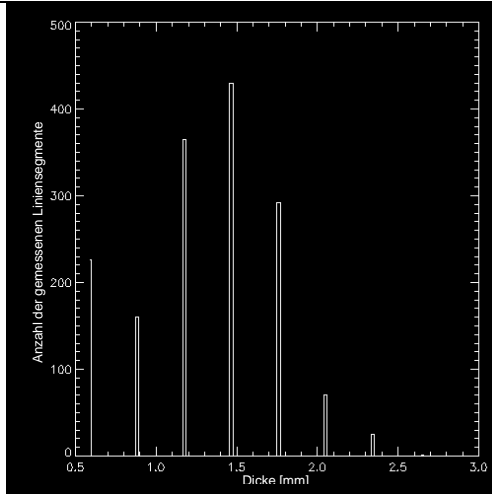


Abbildung 111: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 1

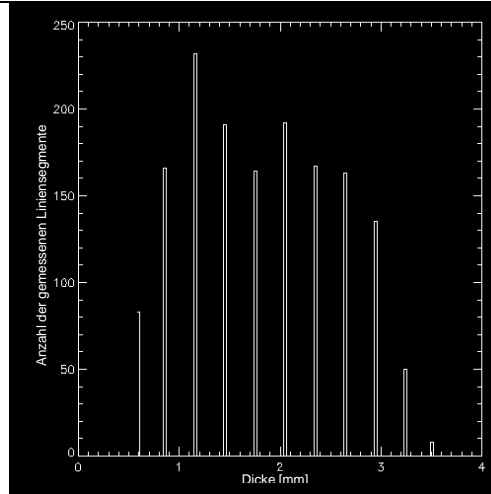


Abbildung 112: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 2

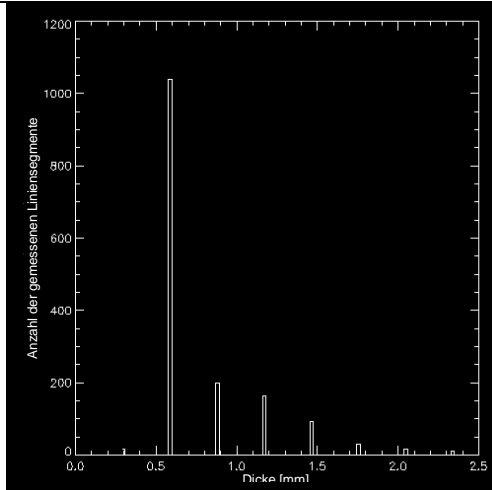


Abbildung 113: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 3

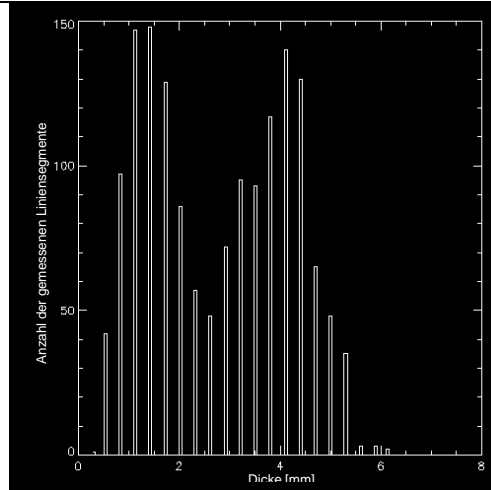


Abbildung 114: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 4

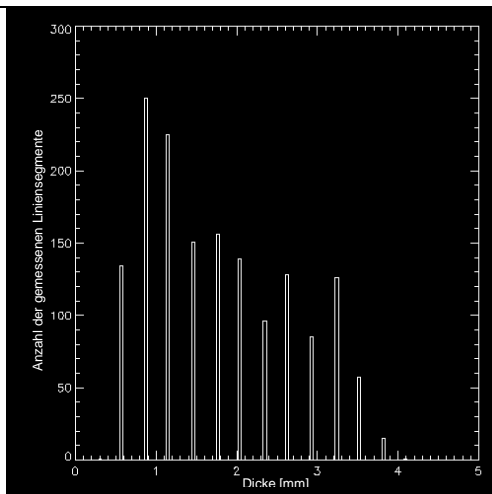


Abbildung 115: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 5

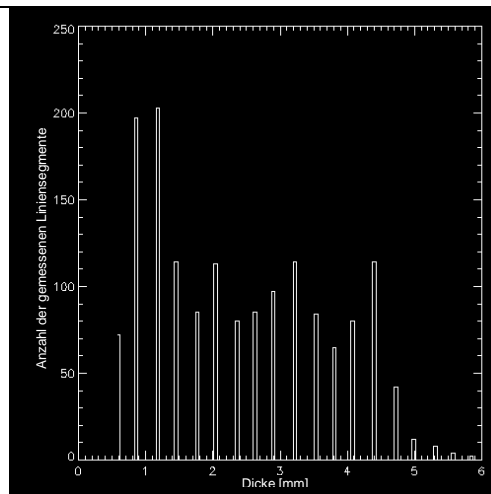


Abbildung 116: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 6

### 3.4.6 Histogramme der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe < 20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften

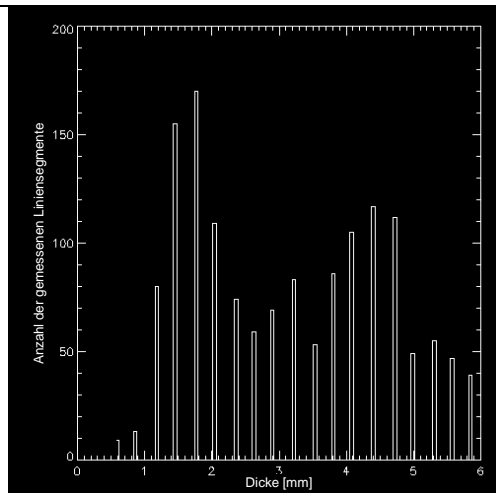


Abbildung 117: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften, Beispiel 1

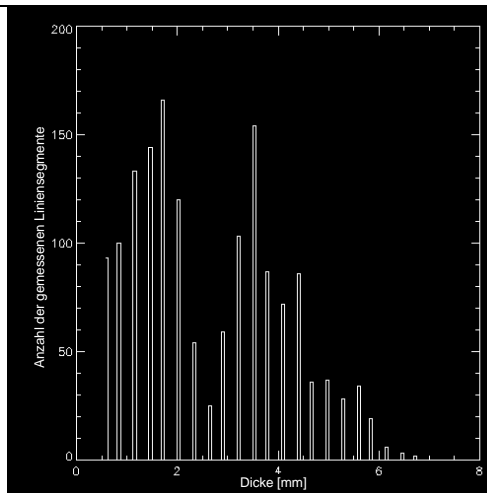


Abbildung 118: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften, Beispiel 2

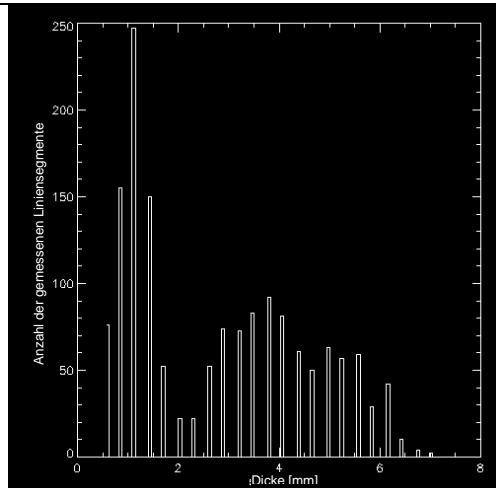


Abbildung 119: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften, Beispiel 3

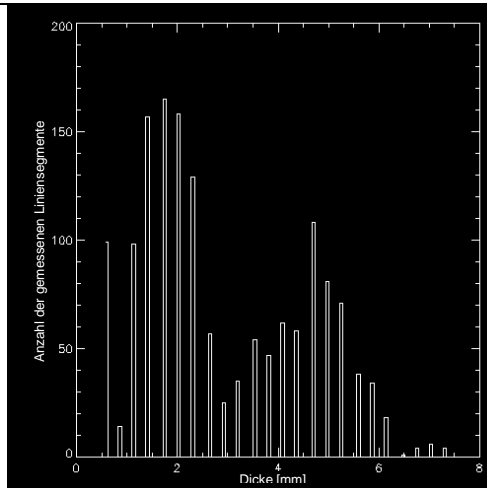


Abbildung 120: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften, Beispiel 4

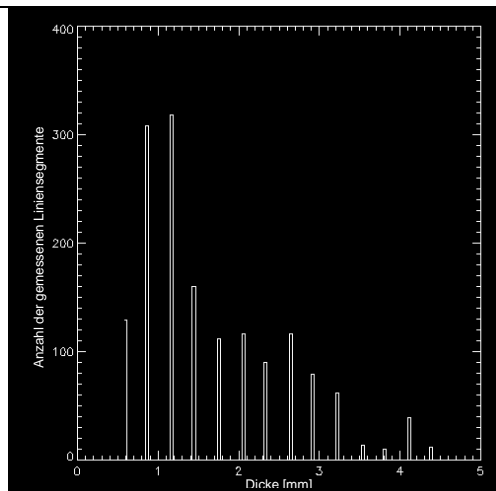


Abbildung 121: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften, Beispiel 5

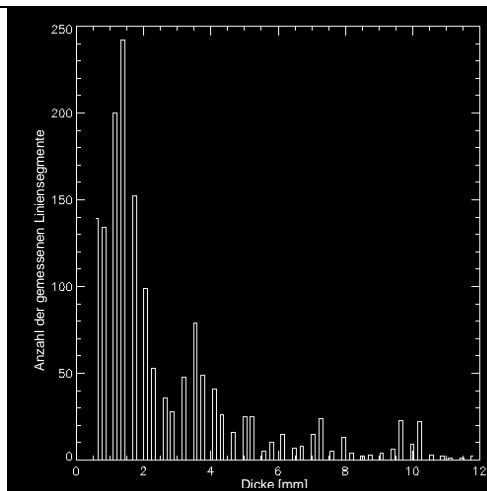


Abbildung 122: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften, Beispiel 6

### 3.4.7 Histogramme der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften

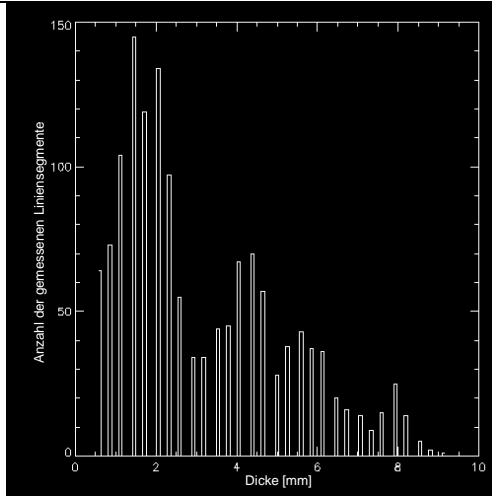


Abbildung 123: Dickenverteilung, männlich,  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 1

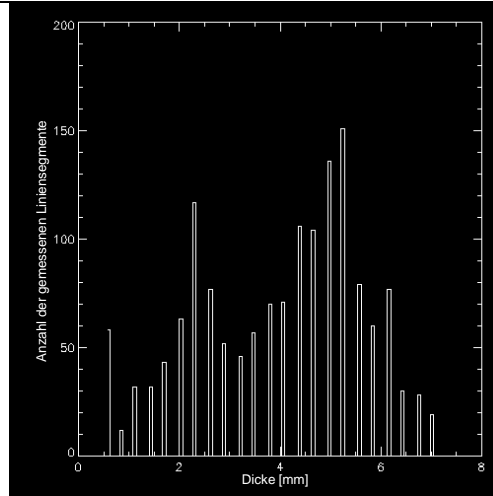


Abbildung 124: Dickenverteilung, männlich,  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 2

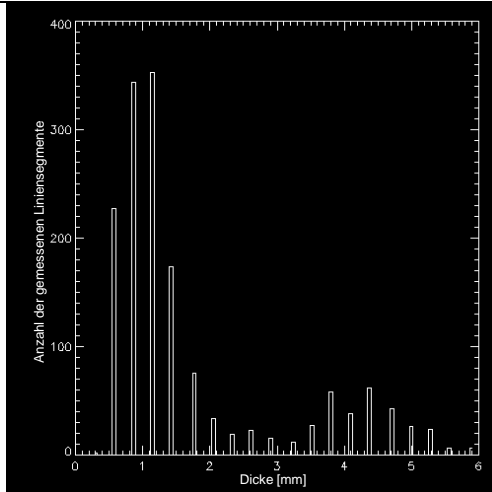


Abbildung 125: Dickenverteilung, männlich,  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 3

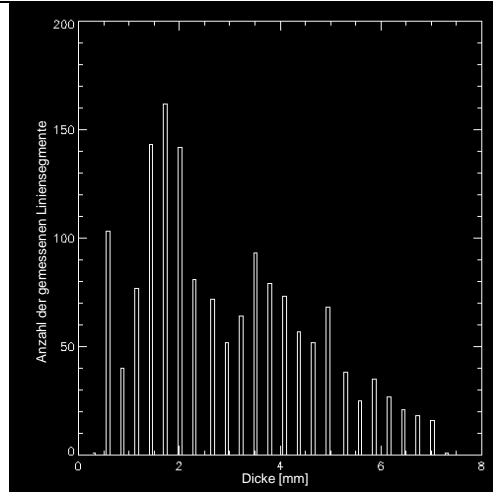


Abbildung 126: Dickenverteilung, männlich,  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 4

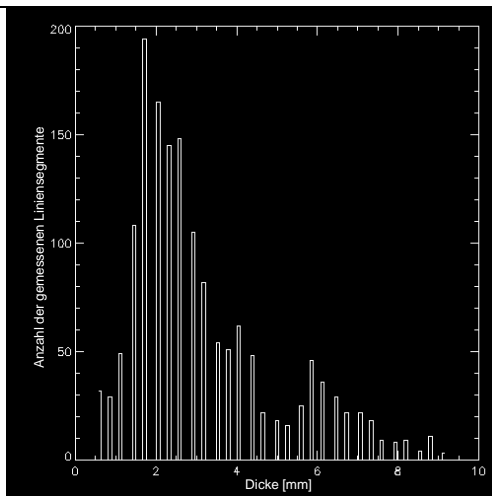


Abbildung 127: Dickenverteilung, männlich,  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 5

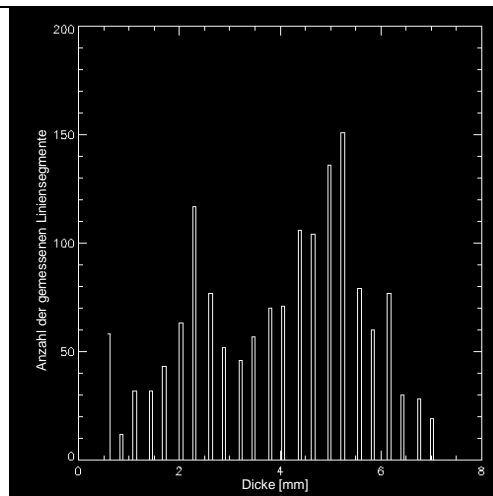


Abbildung 128: Dickenverteilung, männlich,  $\geq 20$  Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 6



### 3.4.8 Histogramme der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften

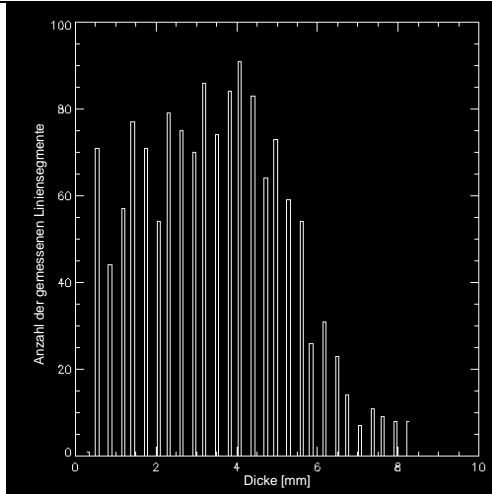


Abbildung 129: Dickenverteilung, männlich,  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften, Beispiel 1

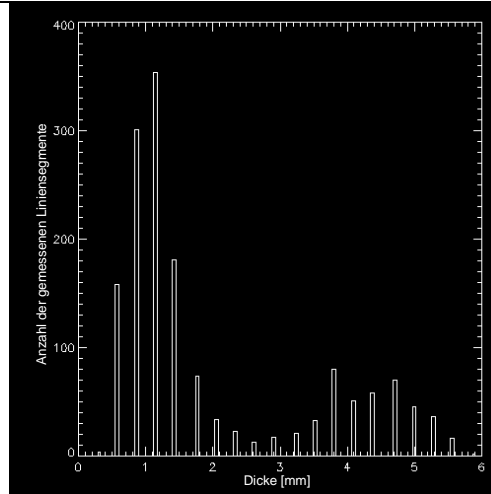


Abbildung 130: Dickenverteilung, männlich,  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften, Beispiel 2

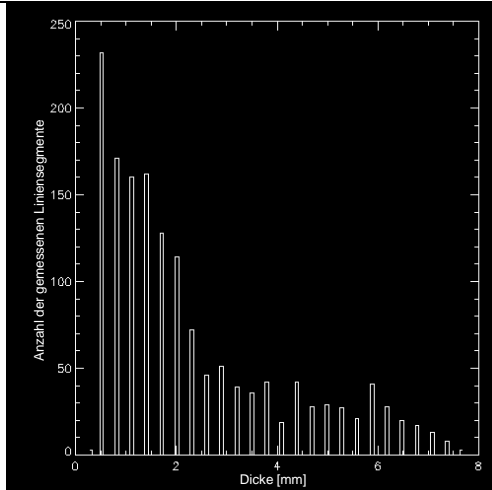


Abbildung 131: Dickenverteilung, männlich,  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften, Beispiel 3

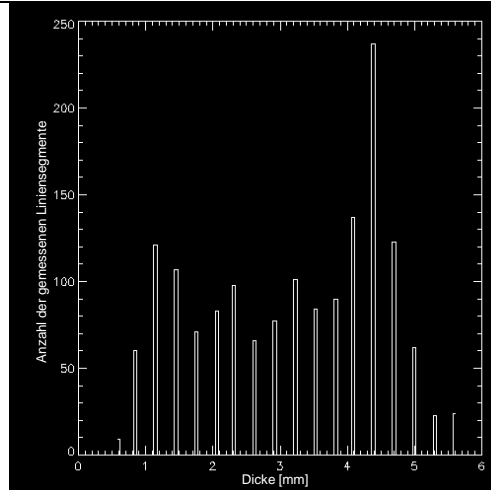


Abbildung 132: Dickenverteilung, männlich,  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften, Beispiel 4

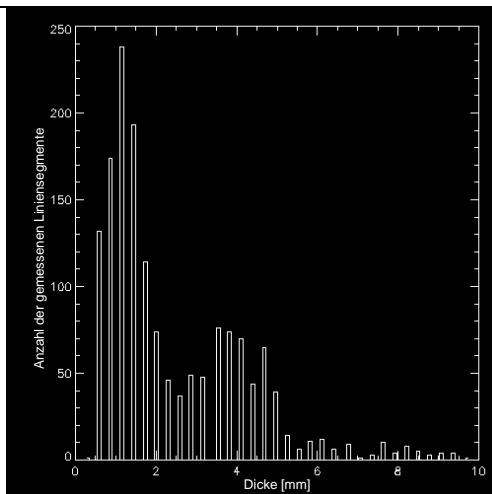


Abbildung 133: Dickenverteilung, männlich,  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften, Beispiel 5

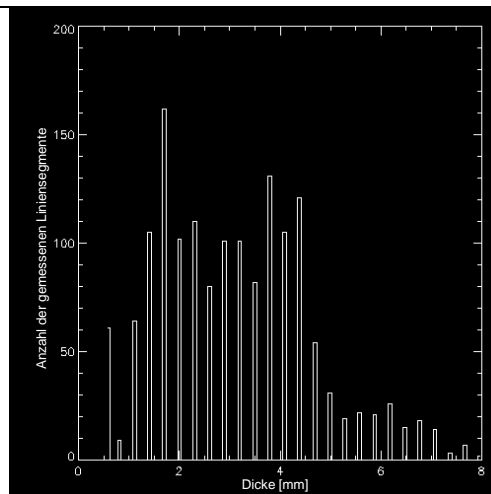


Abbildung 134: Dickenverteilung, männlich,  $\geq 20$  Jahre, okzipitale Kalottenhälften, Beispiel 6

In den Abbildungen 87 bis 134 ist in Histogrammen die Dickenverteilung innerhalb der gemessenen Schädelkalottenhälften getrennt nach Geschlecht und Altersgruppe dargestellt. Insgesamt ist zu erkennen, dass alle Histogramme eine unterschiedliche Verteilung der Dicken darstellen. Die Kalotten im Altersbereich  $<20$  Jahre zeigen eine geringere Dickenausprägung und eine geringere Variation der vertretenen Dicken.

Die Histogramme der Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre zeigen jedoch eine sehr deutliche Variation. Die Unterschiede der Dickenausprägung, dargestellt in den Histogrammen, werden hier besonders deutlich. Hinsichtlich der verschiedenen Histogrammbilder, die schon im Überblick zu erkennen sind, lassen sich an dieser Stelle keine Regelmäßigkeiten erkennen.

## **4. Diskussion**

In der vorliegenden Studie wurde eine automatische Bildanalysemethode von hochauflösenden Flat-Panel-Computertomographie-Bildern zur geschlechtsspezifischen Altersbestimmung evaluiert. Durch das hierfür entwickelte Computerprogramm wurden jeweils 82 Schnittbilder der 676 zur Verfügung stehenden Kalottenhälften untersucht. So wurden durchschnittlich 6176 Messpunkte auf jeder Schädelkalotte durch das Programm ermittelt, in denen radiologische Untersuchungen zur Dicke und Dichte des Knochenmaterials durchgeführt werden konnten.

Die Zielsetzung war, diese Methode auch im Vergleich zu anderen Möglichkeiten zur Identifikation von Personen oder menschlichen Überresten zu analysieren, um einen eventuellen Nutzen für den rechtsmedizinischen Alltag zu überprüfen. Hierzu soll im Folgenden ein Vergleich der vorliegenden Methode mit bereits vorhandenen Methoden zur Analyse von eLU- Bildern menschlicher Schädelkalotten dargestellt werden. Im Verlauf werden dann die eigenen Ergebnisse diskutiert, um abschließend zu einem Fazit und einem Ausblick zu dieser Thematik zu kommen.

### **4.1 Diskussion der Messmethode**

Es ist bekannt, welch zunehmend hohen Stellenwert die digitale Bildgebung in der Rechtsmedizin hat. Bei der CT-Aufnahme post mortem hat die Strahlenbelastung praktisch keinen Nachteil und dennoch können hier die Vorteile der besonders hohen Auflösung dieses bildgebenden Verfahrens genutzt werden. Das Flat-Panel-CT bietet im Speziellen den Vorteil, dass auch die Knochenbinnenstruktur, welche von außen nicht sichtbar ist, originalgetreu dargestellt werden kann. Hierbei ist die Darstellung mit dem eLU vergleichbar mit einer Lupenbetrachtung von originalem Knochenmaterial (Verhoff et al. 2008).

Um genauere und leichter zu objektivierende Methoden zur Alters- und Geschlechtsbestimmung zu entwickeln, wurde das eLU bereits in einige vergangene Arbeiten eingebunden. So wurde die Kalottendicke anhand von Bildern des eLU, alternativ zur Dickenmessung mit dem herkömmlichen Messschieber an einer Workstation (AW) manuell vermessen. Die Nachteile der Messung der Knochendicke mit einem Messschieber am Originalknochen wurden bereits in vergangenen Arbeiten beschrieben (Eska 2013). Die Messung anhand der eLU- Bilder mit einer Auflösung von 0,3 mm bis 0,5 mm soll

im Folgenden näher diskutiert werden. Diese Methode zur manuellen Dickenmessung an der „Gießener Sammlung radiologischer Schädelaufnahmen“ (siehe Kapitel 1.6: „Untersuchungen zur Dickenmessung von Schädelkalotten“) bietet durch die radiologischen Bilder und festgelegte Messalgorithmen eine im Vergleich recht gute Reproduzierbarkeit. Allerdings ist die manuelle Messung der Knochendicke durch einen Untersucher an der Advantage Workstation (AW) auch mit Fehlerquellen behaftet. Da das Bild in Graustufen dargestellt wird, ist die Festlegung des Start- und Endpunktes der Messung nicht genau reproduzierbar definierbar. Eine Dickenmessung durch die visuelle Bestimmung der Position der Lamina interna und Lamina externa sowie die manuelle Durchführung der Messung an der AW ist eine Methode, die bei Reproduktion der Messung durch einen anderen Untersucher auch zu anderen Ergebnissen führen könnte. Des Weiteren wurden im Rahmen der beschriebenen Studie zur Dickenmessung nur Messungen im frontalen Bereich der Schädelkalotte durchgeführt. Auch die durch den zeitlichen Aufwand der manuellen Messung bedingte relativ kleine Anzahl von 30 Einzelmessungen pro Kalottenhälfte gibt keinen großflächigen Überblick über die Dickenverteilung einer Kalotte.

Die automatische Dickenmessung mit einer auf bestimmte Messgrößen abgestimmten Software stellt eine neue Möglichkeit der Vermeidung oben genannter möglicher Fehlerquellen unter Verwendung der hochauflösenden eLU-Bilder dar. Durch das neu entworfene Computerprogramm ist jede Einzelmessung an einer Schädelkalotte genau definiert und kann auf jede Schädelkalotte unter Berücksichtigung derselben Gesichtspunkte angewandt werden. Die Start- und Endpunkte einer Dicken- oder Dichtenmessung werden immer mit dem im Kapitel 2. Material und Methoden beschriebenen Algorithmus festgelegt und sind somit unabhängig von subjektiven visuellen Interpretationsspielräumen. Da jedes Voxel der darstellenden Matrix vom Computer genau registriert wird, ist eine maximal hohe Messgenauigkeit anhand der Bilder gewährleistet. Den größten Vorteil der automatischen Dickenmessung stellt allerdings die besonders große Anzahl von Einzelmessungen pro Kalotte dar. Durchschnittlich wurden an jeder der 676 Kalottenhälften 6176 Messpunkte bestimmt, was eine sehr viel engmaschigere Betrachtung der unterschiedlichen Dickenausprägungen der einzelnen Kalotten ermöglicht. Diese große Datenmenge kann außerdem in kürzester Zeit ermittelt werden.

Einen weiteren Vorteil der automatischen Messung von Schädelkalotten in der vorliegenden Studie besteht darin, dass die Dickenmessung und die Knochendichtemessung

in dem zuvor bestimmten Messpunkt innerhalb eines Arbeitsschrittes bestimmt werden können. In einer vorherigen Studie wurde die Knochendichte der Schädelkalotten an der „Gießener Sammlung radiologischer Schädelaufnahmen“ bereits betrachtet (siehe Kapitel 1.5: „Nichtinvasive radiologische eLU Untersuchung an der „Gießener Sammlung radiologischer Schädelaufnahmen“). Hier wurde die Knochendichte von Männern und Frauen mit abgeschlossenem Schädelwachstum automatisch untersucht (Schulte-Geers et al. 2011). Die Knochendichte wurde hier durch Bestimmung der Summe von Hounsfield-Einheiten für eine gesamte Schädelkalotte bestimmt. So entstand für jede Schädelkalotte ein Wert, welcher die Knochendichte des jeweiligen Schädeldaches darstellte.

In der vorliegenden Studie konnte die Knochendichte in jedem einzelnen zuvor festgelegtem Messpunkt bestimmt werden, was auch eine genauere Betrachtung der Variabilität der Knochendichte innerhalb einer Kalotte zulässt. Da diese Dichtemessung durch die Messung der HE jedes einzelnen Voxels, welches von dem Liniensegment geschnitten wurde, zustande kommt, ist sogar die Variabilität innerhalb eines Liniensegmentes darstellbar.

Eine automatische Messung der Dicke und Dichte mit Hilfe automatisch festgelegter Liniensegmente kann allerdings auch zu Fehlern führen, die durch eine manuelle Messung am Knochenmaterial oder eine manuell-visuelle Messung anhand von eLU-Bildern eher vermieden werden könnte. So kann es zu falschen Messungen an den im Rahmen der Sektion zu Stande gekommenen künstlichen Schnittkanten der Schädelkalotten kommen. Wenn die Schädelkalotte leicht schräg abgesetzt wurde, kann im Querschnitt an dieser Stelle ein fälschlicherweise zu kleines Ergebnis der Dickenmessung zustande kommen. Diese mögliche Fehlerquelle ist aufgrund der hohen Anzahl an untersuchten Liniensegmenten pro Kalotte zu vernachlässigen. Durch eine Änderung der Software könnte hier ein Sicherheitsabstand der Messungen zur oben genannten Schnittkante eingeführt werden, welcher falsche Messungen in diesem Bereich verhindern könnte. Des Weiteren kann in der vorliegenden Studie nicht die Region am Frontal- bzw. Okzipitalpol der Schädelkalotte vermessen werden, da hier im Querschnitt fälschlicherweise zu große Kalottendicken gemessen würden. Praktisch wurden die Bildbereiche von Frontal- bzw. Okzipitalpol von der Untersuchung deshalb in dieser Arbeit ausgeschlossen. Durch die technisch bedingte Aufnahme der Schädelkalotten in zwei Teilbildern kommt es außerdem zu einer Überlappung der beiden Bilder im zentralen Bereich der Schädelkalotte, was zur weiteren Verstärkung dieses Bereiches in der

Gewichtung der Messergebnisse führen kann. Hierzu wäre eine Fusion der beiden Teilbilder der Kalotten zu einem vollständigen Bild in einer Folgearbeit sinnvoll. So könnte ein noch realeres Bild der Schädelkalotten für Untersuchung zur Verfügung stehen. In der hier durchgeführten Arbeit wurden die prinzipiell mögliche Fehlgewichtungen, durch doppelte Auswertung gleicher Kalottenbereiche im Zentralteil, dadurch minimiert, dass sicherheitshalber eine Anzahl von jeweils 18 Schnittbildern zur zentralen Schnittkante  $k$  hin, zwischen frontaler und okzipitaler radiologischer Kalottenuntersuchung, nicht in die Auswertung mit einbezogen wurden (siehe Kapitel 2.5 „Datenvorbereitung zur automatischen Bildanalyse“).

## **4.2 Diskussion der eigenen Ergebnisse**

Im folgenden Abschnitt sollen die Ergebnisse dieser Arbeit und die daraus abzuleitende Schlussfolgerungen evaluiert werden. Da die Dicke und die Dichte der Schädelkalotten sehr variabel sind, sollten mithilfe der großen Datenmengen verschiedene statistische Kenngrößen und Analysemethoden hinsichtlich ihres eventuellen praktischen Nutzens für die geschlechtsspezifische Altersbestimmung evaluiert werden.

### **4.2.1 Altersverteilung der Kalotten**

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Schädelkalotten sind hinsichtlich ihres Geschlechts und der Zuordnung zu Altersgruppen unterschiedlich verteilt. Dies ist auf die Gewinnung des Materials im Rahmen des Sektionsalltags zu begründen. So ist die Gruppe der männlichen Kalotten mit der Anzahl von 224 Kalotten deutlich größer als die der weiblichen mit 120 Kalotten. So ist intuitiv die Signifikanz der Ergebnisse der männlichen Kalotten größer.

Innerhalb der Gruppe der weiblichen Kalotten (Abbildung 17) ist zu erkennen, dass die Altersgruppe  $<20$  Jahre mit 8 Kalotten relativ klein ist, wobei diese Kalotten sich alle im Altersbereich unter 10 Jahren befinden. Damit ist die Wahrscheinlichkeit, dass die statistischen Ergebnisse in Bezug auf diese Gruppe nicht repräsentativ sind, sehr groß. In der Gruppe  $\geq 20$  Jahre sind bei den weiblichen Kalotten in der zweiten bis zur neunten Altersdekade jeweils 6 bis 23 Kalotten ausgewertet worden. Damit sind die Ergebnisse in dieser Altersgruppe für eine altersabhängige Auswertung gut geeignet.

Die männlichen Schädelkalotten (Abbildung 18) sind in der Altersgruppe  $<20$  Jahre mit insgesamt 16 Schädelkalotten nur gering vertreten. Hier ist die Altersverteilung aller-

dings gleichmäßig gestreut. Dennoch eignen sich diese Daten wegen der geringen Anzahl der Kalotten nicht zur Auswertung. Bei der Gruppe  $\geq 20$  Jahre ist die statistische Situation deutlich günstiger. Hier liegen in der zweiten bis zur achten Dekade jeweils 13 bis 49 Kalotten pro Dekade vor. In der neunten und zehnten Dekade ist allerdings jeweils nur eine Kalotte vorhanden, welches eine Aussage für diese Altersbereiche nicht möglich macht.

#### **4.2.2 Mittelwert der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter**

Bei Betrachtung der Korrelation des Mittelwertes der Dicke pro Kalottenhälfte mit dem Alter ist in der Altersgruppe  $< 20$  Jahre sowohl bei den männlichen als auch bei den weiblichen Kalotten in der frontalen und der okzipitalen Kalottenhälfte eine deutlich positive Korrelation zu erkennen (Ergebnisse 3.2.1 sowie Tabellen 3 und 4). Für die weiblichen Kalotten liegen die Korrelationskoeffizienten hier bei 0,81 im frontalen und 0,77 im okzipitalen Kalottenbereich. Für die männlichen liegen die Korrelationskoeffizienten 0,82 im frontalen und 0,57 im okzipitale Kalottenbereich vor. Diese Ergebnisse sind durch das starke Wachstum der Schädelkalotte bis zum 20. Lebensjahr zu begründen und sind aus physiologischer Sicht leicht nachvollziehbar. Eine genauere Untersuchung dieser Ergebnisse ist aufgrund der zu geringen Anzahl an vorhandenen Schädelkalotten in dieser Altersgruppe nicht sinnvoll. In der Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre liegen für die Frauen die Korrelationskoeffizienten -0,24 (frontal), -0,03 (okzipital) und für die Männer -0,14 (frontal), -0,13 (okzipital) vor. Damit ist in dieser Altersgruppe nicht auf eine Korrelation der Kalottendicke mit dem Alter zu schließen. Diese Methode der Auswertung der Messungen ist somit für die Erstellung einer Altersbestimmungsmethode nicht geeignet.

#### **4.2.3 Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter**

In der Altersgruppe  $< 20$  Jahre ist sowohl bei den weiblichen als auch bei den männlichen Kalotten in beiden Kalottenhälften eine deutlich positive Korrelation zwischen der Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte und dem Alter zu erkennen (Ergebnisse 3.2.2 sowie Tabellen 3 und 4). Nur die männlichen okzipitalen Kalottenhälften dieser Altersgruppe weisen hier mit 0,32 einen relativ kleinen Korrelationskoeffizienten auf. Aus den anderen Ergebnissen lässt sich wegen der hohen Korrelationkoeffizienten allerdings schließen, dass die Inhomogenität der Schädeldicke in der jungen Altersgruppe proportional zum Alter zunimmt. In der anderen Altersgruppe,  $\geq 20$  Jahre, ist kein

Zusammenhang zwischen der Unregelmäßigkeit der Schädeldicke und dem Alter zu erkennen.

#### **4.2.4 Relative (prozentuale) Standardabweichung der Dicke pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter**

Die relative (prozentuale) Standardabweichung der Schädeldicke kann auch als relativer Fehler bezeichnet werden. Hier soll der absolute Einfluss der Kalottendicke auf die Inhomogenität der Kalottendicke aus der Betrachtung herausgenommen werden. Die statistische Auswertung (Ergebnisse 3.2.3 sowie Tabellen 3 und 4) zeigt aber auch hier unter Betrachtung aller zur Verfügung stehenden Kalotten sowohl für die Frauen als auch für die Männer, dass die Variabilität der Kalottendicke nicht vom Alter abhängig ist.

#### **4.2.5 Mittelwert der Gesamtsumme der HE pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter**

Des Weiteren wurde die Knochendichte der Schädelkalotten anhand der im eLU gemessenen Hounsfield Einheiten (HE) mithilfe verschiedener statistischer Parameter untersucht. Der Mittelwert der Gesamtsumme der HE pro Kalottenhälfte (Ergebnisse 3.2.4 sowie Tabellen 3 und 4) zeigt in der Altersgruppe <20 Jahre sowohl für die weiblichen als auch für die männlichen Kalotten eine deutlich positive Korrelation mit dem Alter. Somit ist auf eine proportionale Zunahme der Knochendichte mit dem Alter der unter 20-jährigen zu schließen. Die geringe Anzahl der untersuchten Kalotten erlaubt jedoch keine Ableitung eventueller Altersbestimmungsmethoden. In der Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre liegen für die weiblichen Kalotten Korrelationskoeffizienten von -0,43 (frontal) und -0,49 (okzipital) vor. Für die männlichen Kalotten dieser Altersgruppe sind Korrelationskoeffizienten von -0,16 (frontal) und -0,14 (okzipital) zu erkennen. Damit liegt für die Männer keinerlei Korrelation vor. Für die Frauen ist allerdings eine deutlich negative Korrelation zu erkennen. Daraus lässt sich schließen, dass der Mittelwert der Gesamtsumme der HE in beiden Kalottenteilen der älteren Frauen mit dem Alter deutlich abnimmt. Es könnte somit bei den älteren weiblichen Schädelkalotten auf eine sich stärker verringernde Dichte als bei den männlichen Schädelkalotten geschlossen werden.

#### **4.2.6 Standardabweichung der Gesamtsumme der HE pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter**

Hinsichtlich der Standardabweichung der Gesamtsumme der HE bezogen auf das Alter (Ergebnisse 3.2.4 sowie Tabellen 3 und 4) ist in der Gruppe <20 Jahre für die weibli-



chen und für die männlichen Kalotten ebenfalls eine positive Korrelation zu erkennen. Das heißt, dass die Inhomogenität der Knochendichte innerhalb einer Kalottenhälfte in der untersuchten Gruppe mit dem Alter zunimmt. In der Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre liegen zu beiden Geschlechtern leicht negative Korrelationskoeffizienten vor, die allerdings so geringfügig sind, dass keine Aussage zu einer Abnahme der Inhomogenität der Knochendichte mit fortschreitendem Alter möglich ist.

#### **4.2.7 Mittelwert des Mittelwertes der HE pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter**

Wenn nun zu jeder Kalottenhälfte der Mittelwert aller Mittelwerte der in einem Linien-segment gemessenen Hounsfield Einheiten (HE) betrachtet wird (Ergebnisse 3.2.6 sowie Tabelle 3), so ist festzuhalten, dass in der Altersgruppe  $< 20$  Jahre bei beiden Geschlechtern ebenfalls eine positive Korrelation vorliegt. In der Gruppe  $\geq 20$  Jahre ist eine negative Korrelation festzustellen, wobei die Korrelation der weiblichen Kalotten mit Korrelationskoeffizienten von -0,42 (frontal) -0,48 (ocipital) mit dem Alter stärker negativ ist als die der männlichen. Daraus lässt sich schließen, dass durch diesen Parameter ein Unterschied zwischen männlichen und weiblichen Schädelkalotten in der Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre dargestellt wird. Der Zusammenhang zwischen dem Mittelwert des Mittelwertes der HE und dem Alter ist in der Altersgruppe  $\geq 20$  bei den Frauen deutlich stärker negativ als bei den Männern. Es könnte durch diesen Parameter bei den älteren Frauen auf eine stärkere Abnahme der Knochendichte als bei den älteren Männern geschlossen werden.

#### **4.2.8 Standardabweichung des Mittelwertes der HE pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter**

Dieser Parameter stellt die Inhomogenität der Kalottendichte innerhalb der gemessenen Liniensegmenten für jede Kalottenhälfte dar. Bei Betrachtung der Korrelation im Altersbereich  $< 20$  Jahre fällt eine positive Korrelation in den Gruppen beider Geschlechter auf. In der Gruppe  $\geq 20$  Jahre ist keine nennenswerte Korrelation zu erkennen, wobei auch hier in der Gruppe der weiblichen Kalotten etwas stärker negative Korrelationskoeffizienten vorliegen, was auf eine stärkere Abnahme der Inhomogenität der Knochendichte im Alter der Frauen sprechen würde.

#### **4.2.9 Mittelwert der Standardabweichung der HE pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter**

Bei der Betrachtung des Mittelwertes der Standardabweichungen, welche aus den gemessenen Hounsfield Einheiten (HE) in den einzelnen Liniensegmenten ermittelt wurde, könnten Rückschlüsse darauf gezogen werden, wie stark die gemessene Knochendichte innerhalb der einzelnen Liniensegmente im Mittel pro Kalottenhälfte variiert und ob hier ein Zusammenhang zum Alter vorliegt. Im Altersbereich <20 Jahre liegt für beide Geschlechter eine positive Korrelation vor, die aber nicht stark genug ausgeprägt ist, um Rückschlüsse auf eine Altersabhängigkeit zu ziehen. Ferner gilt wieder die eingeschränkte Beurteilungsmöglichkeit durch die zu geringe Gruppengröße in diesem Altersbereich. In der Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre ist für die männlichen Kalotten keine Korrelation festzustellen. Bei den weiblichen Kalotten zeigt sich eine stärker negative Korrelation, welche mit Korrelationskoeffizienten von -0,49 und -0,58 dargestellt wird. Damit ist ein deutlicher geschlechtsspezifischer Unterschied zu erkennen. Es könnte durch Auswertung dieser Parameter hinsichtlich der Variation der Knochendichte innerhalb einer Schädelkalotte bei den älteren Frauen auf eine deutlich stärkere Verringerung mit dem Alter als bei den Männern geschlossen werden.

#### **4.2.10 Standardabweichung der Standardabweichung der HE pro Kalottenhälfte in Abhängigkeit zum Alter**

Bei der Berechnung der Standardabweichung der Variabilität, welche in den einzelnen Liniensegmenten der jeweiligen Kalottenhälften gemessen würde, ist in Bezug auf das Alter in der Gruppe <20 Jahre eine positive Korrelation zu erkennen. Bei den männlichen Kalotten ist ein relativ großer Unterschied der Ausprägung der Korrelationskoeffizienten mit 0,86 (frontal) und 0,47 (okzipital) zu erkennen. In der Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre ist bei beiden Geschlechtern keine Korrelation mit dem Alter festzustellen.

### **4.3 Einordnung der eigenen Ergebnisse in die vorhandene Literatur zur Altersbestimmung in der Rechtsmedizin**

Im folgenden Abschnitt sollen die eigenen Ergebnisse in Verbindung zur vorhandenen Literatur zur Altersbestimmung in der Rechtsmedizin gestellt werden. Es ist bekannt, dass die Altersbestimmung in der Rechtsmedizin meist ein Prozess ist, der durch die Kombination von vielen verschiedenen Methoden zum bestmöglichen Ergebnis führt (Dettmeyer et al. 2011). Deshalb soll evaluiert werden in welchem Verhältnis die vor-

liegende Methode zu bereits beschriebenen Erkenntnissen in der Literatur stehen könnte.

Grundsätzlich muss bei einer Altersbestimmungsmethode immer das chronologische von dem biologische Alter unterschieden werden (Kreutz und Verhoff 2002). Dies ist auch bei der Betrachtung der eigenen Ergebnisse zu berücksichtigen. So wäre durch eine Dicken- und Dichtenmessung anhand von radiologischen Bildern des eLU nur eine Bestimmung des biologischen Alters möglich, da natürlich auch die Knochendicke und -dichte am Schädel von äußeren Einflüssen wie ansetzender Muskulatur oder dem Status degenerativer Erkrankungen abhängig ist (Kreutz und Verhoff 2002). Durch nähere Informationen zu dem Gesundheitszustand und dem biologischen Alter der Verstorbenen, dessen Schädelkalotten untersucht wurden, wäre an dieser Stelle eine differenziertere Beurteilung der Knöchernen Strukturen möglich. Auch ein angepasstes Verfahren der differenzierten Beurteilung von kindlichen Schädelkalotten und Kalotten von Erwachsenen könnte zu genaueren Ergebnissen führen. So sind auch in der Literatur meist getrennte Altersbestimmungsmethoden für Kinder und Erwachsene beschrieben (Rösing et al. 2005).

Die rechtsmedizinischen Untersuchungen am kindlichen Skelett, welche sich auf den Verschluss von Epiphysenfugen an vielen verschiedenen Knochen stützt, lässt gemeinsam mit dem Zahnstatus eine relativ genaue Abschätzung des Alters zu (siehe Tabelle 1 nach Dettmeyer et al. 2011). Die Untersuchung der Epiphysenfugen ist mittlerweile auch mithilfe von sonographischen Verfahren gut durchzuführen und bietet daher im Gegensatz zum CT auch in Hinsicht auf die Strahlenbelastung von Lebenden einen wichtigen Vorteil (Galonska 2001). Die Genauigkeit der Altersschätzung durch diese Methode wäre durch die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Ergebnisse nicht zu verbessern.

Eine Bestimmung des chronologischen Alters von Erwachsenen, wie es durch den Razemisierungsgrad von Asparaginsäuren im Dentin des menschlichen Zahns möglich ist, ist durch seine Genauigkeit und Unabhängigkeit von Einflussfaktoren für eine rechtsmedizinische Altersbestimmung besonders interessant (Ritz-Timme 1999). Hier ist die Bestimmung des Alters auf eine besonders subjektive Art und Weise möglich, weil die Beschaffenheit der Aminosäuren objektiv genau bestimmt werden kann. Auch die Altersbestimmung durch eine automatische Bildanalysemethode im eLU könnte eine

große Subjektivität gewährleisten. Beispielsweise erfolgt hier die Bestimmung der Dichte des knöchernen Materials von Schädelkalotten durch automatische Zählung der Hounsfield Einheiten in den vorhandenen Voxeln des CT und lässt somit auch keinen subjektiven Interpretationsspielraum. Auf genaue Altersbestimmungsmethoden, wie sie mithilfe des Razemisierungsgrades durchgeführt werden können, lässt sich mit der in dieser Arbeit untersuchten Methode allerdings nicht schließen, da die Korrelationen zwischen den untersuchten Parametern und dem Alter nicht ausreichen, um daraus Altersbestimmungsmethoden abzuleiten. Dennoch stellen radiologische Untersuchungen einen wichtigen Bestandteil der Rechtsmedizinischen Untersuchung dar. Es wäre also wünschenswert in weiteren Untersuchungen die Möglichkeiten, die diese automatische Untersuchung von radiologischen Bildern bietet in eventuell modifizierter Form oder an anderen Bereichen des menschlichen Körpers durchzuführen.

Die in der vorliegenden Studie erfassten Ergebnisse zur Dickenmessung, welche durch eine neu entwickelte Software zur automatischen Dicken- und Dichtenmessungen an Schädelkalotten entstanden sind, lassen sich außerdem vergleichen mit oben erwähnten Studien zur manuellen Auswertung von Bilddaten des eLU (Eska 2013). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zum Zusammenhang von Kalottendicke und Alter mit ihren verschiedenen untersuchten statistischen Parametern stimmen in der Tendenz ihrer Aussagekraft mit denen, welche von Eska beschrieben wurden, zum größten Teil überein. Durch die besonders große Anzahl von Einzelmessungen, welche über eine große Fläche des gesamten Schädels verteilt durchgeführt wurden, ist die vorliegende Studie hinsichtlich ihrer Aussagekraft noch differenzierter und methodisch reproduzierbarer. Bei Betrachtung der so ermittelten Korrelationen wird deutlich, dass sich aus den vorliegenden Methoden der automatischen Dickenmessung direkt keine geeignete Methode zur Altersbestimmung an Schädelkalotten für die Rechtsmedizin ergibt. Nach den Kenntnissen vorangegangener Studien war mit Ergebnissen dieser Art zu rechnen (Eska 2013).

Bei der Auswertung der Untersuchungen zur Dichtenmessung wurden zahlreiche statistische Parameter geschlechtsspezifisch auf ihren möglichen Zusammenhang mit dem Alter untersucht. Bei der Evaluation dieser automatischen Dichtemessungen an Schädelkalotten ergeben sich im Vergleich zu anderen Ergebnissen zu diesem Themengebiet auch neue Schlussfolgerungen (Schulte-Geers et al. 2011). Schulte-Geers hat den Zusammenhang der Knochendichte der Schädelkalotte als Summe der in jeweils einer

Schädelkalotte gemessenen Hounsfield Einheiten (HE) durch das eLU in Abhängigkeit zum Alter untersucht. Dabei wurde eine altersabhängige Knochendichteabnahme bei erwachsenen Frauen gefunden – bei erwachsenen Männern nicht. Diese Ergebnisse konnten in dieser Studie bestätigt werden. In der vorliegenden Studie allerdings konnte durch die insgesamt 4,2 Millionen Einzelmessungen eine Aussage über die Verteilung der Knochendichte innerhalb eines Schädels durch verschiedene statistische Methoden getroffen werden. In dieser Studie wurde mit der Untersuchung der Variabilität der Knochendichte noch einen Schritt weiter gegangen und gezeigt, dass die Variabilität der Knochendichte altersabhängig bei den erwachsenen Frauen abnimmt, bei den Männern hingegen gleich groß bleibt. Für die Osteologie ist diese hier gezeigte Untersuchungsmethodik der verschiedenen Variabilität durchaus interessant. Vielleicht ist auch die Variabilität der Knochendichte in einem osteoporotischen Knochen anders?

#### **4.4 Schlussfolgerung und Ausblick**

Bei der Betrachtung der Histogramme zur Verteilung der Dickenauswertung der Kalotten (Ergebnisse 3.4) wird eine hochgradige Komplexität und Variationsbreite der Übersicht zur Dickenverteilung der erwachsenen Kalotten deutlich. Die Histogramme der Schädelkalotten in der jüngeren Altersgruppe zeigen deutlich geringere Dicken. Die Variation der Dicken ist hier allerdings nicht so groß, wie bei den erwachsenen Schädeln. Bei den Histogrammen der erwachsenen Schädel fällt auf, dass die Ausprägungen der Histogramme deutlich individuell verschieden sind. Diese Darstellungen der jeweiligen Schädelkalotten, welche mit ihren Eigenschaften als individuelle „Signaturen des Schädels“ bezeichnet werden können, könnten so eventuell den Inhalt einer neuen Identifikationsmethode von unbekannten Personen oder menschlichen Überresten darstellen. Im klinischen Alltag werden mittlerweile von immer mehr Menschen im Laufe ihres Lebens CT-Aufnahmen des Schädels für diagnostische Zwecke hergestellt und gespeichert. Die durch die Histogramme verdeutlichte Dickenverteilung innerhalb einer Schädelkalotte könnte so auch anhand von klinischen CT-Bildern ermittelt werden, um diese mit zu einem späteren Zeitpunkt ermittelten Verteilungen in CT-Aufnahmen zu vergleichen. Dieses Vorgehen könnte beispielsweise in der Rechtsmedizin zur Identifikation von Unbekannten durch die oben beschriebene „Signatur des Schädels“ von großer Bedeutung sein. Dazu müsste vorab der allgemeine Einfluss des Alters auf die Variabilität dieser „Schädel-Dicken-Signatur“ sichergestellt werden. Aussagen hierzu könnten sich

aus dem Vergleich von verschiedenen CT-Bildern eines Menschen, die in unterschiedlichem Alter aufgenommen wurden ergeben. Vorstellbar wäre die Entwicklung von Methoden, die unter Umständen äquivalent zu anderen biometrischen Verfahren wie zum Beispiel dem Fingerabdruck eingesetzt werden könnten.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Parameter nur anhand von zweidimensionalen Schnittbildern der Schädelkalotten ermittelt. Eine Software zur automatischen dreidimensionalen Beschreibung der Schädelkalotte, welche als eine Halbschale eines Rotationselipsoids angenähert dargestellt wird, ist mit einer Evaluation der Dicken- und Dichtenverteilung der Kalotten bereits im Forschungsbereich VCT der Abteilung Neuroradiologie des Universitätsklinikums Gießen, betreut durch Herrn Dr. Martin Obert, in Entwicklung. In einem ersten Schritt sollen dabei die Daten der beiden einzelnen radiologischen Datensätze der frontalen und okzipitalen Kalottenhälften zu einer Halbschale fusioniert werden. Die Kalotten schneidende Liniensegmente werden dann ausgehend von den beiden Brennpunkten des Rotationselipsoids aus erzeugt.

## 5. Zusammenfassung

Radiologische Untersuchungsmethoden stellen einen zunehmend wichtigen Teil der Ermittlung verschiedenster Analyseinhalte in der Rechtsmedizin dar. In der vorliegenden Studie wird eine automatisierte Bildanalysemethode computertomographischer Schädelkalottenbilder zur geschlechtsspezifischen Altersbestimmung evaluiert. Ziel ist es mit dieser neuen Methode Untersuchungsmöglichkeiten für die Rechtsmedizin zu ermitteln.

Es wurden insgesamt 344 Schädelkalotten von 120 Frauen und 224 Männern europäischer Abstammung, welche während des alltäglichen Sektionsbetriebs im Institut für Rechtsmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen, den Leichnamen entnommen wurden, in die Untersuchungen aufgenommen. Das Alter der untersuchten Schädelkalotten lag zwischen drei Monaten und 100 Jahren. Zur Erhebung der Daten wurden die radiologischen Bilder der Kalotten in der Abteilung für Neuroradiologie des Universitätsklinikums Gießen, mit einem hochauflösenden eXplore Locus Ultra Computer Tomographen (eLU) rekonstruiert. Die Bilder wurden an der Bildverarbeitungs- und Bildbetrachtungseinheit, „Advantage Workstation“, der Version 4.1 für die Messungen vorbereitet und durch eine in der IDL<sup>6</sup> Computersprache für diese Arbeit entwickeltes Programm ausgewertet.

Die Dicke und Dichte der Schädelkalotten wurden für beide Geschlechter jeweils in einer Altersgruppe  $<20$  Jahre und in einer Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre getrennt für die frontalen und die okzipitalen Kalottenhälften statistisch ausgewertet. Für die junge Altersgruppe wurde sowohl hinsichtlich der Knochendicke als auch der Knochendichte eine positive Korrelation mit dem Alter festgestellt. Durch die zu geringe Anzahl von zur Verfügung stehenden Kalotten konnte aus den Ergebnissen dieser Altersgruppe allerdings keine Altersbestimmungsmethode abgeleitet werden. In der Gruppe  $\geq 20$  Jahre, für die eine hohe Anzahl von Kalotten in fast allen Altersdekaden vorlag, konnte, anders als bei der jungen Altersgruppe, kein Zusammenhang zwischen der Kalottendicke und dem Alter festgestellt werden. Hinsichtlich der Knochendichte konnte in der älteren Gruppe der weiblichen Schädelkalotten durch Betrachtung der Mittelwerte der gemessenen Hounsfield Einheiten (HE) in den einzelnen Liniensegmenten eine stärker negative Kor-

---

<sup>6</sup> Zur Erstellung der Software wurde folgendes Programm verwendet: IDL®, Version 8.1.0, Execlis Visual Information Solutions, Boulder, Colorado, USA, 2012

relation der Knochendichte mit dem Alter als in der Gruppe der Männer festgestellt werden. Ein weiterer geschlechtsspezifischer Unterschied zeigte sich in der Variation der Dichte der erwachsenen Schädelkalotten. Es wurde deutlich, dass die Variation der Dichte bei den erwachsenen Frauen eine deutlich stärker negative Korrelation mit dem Alter zeigt als bei den erwachsenen Männern. Die Korrelation der Knochendichte mit dem Alter und die Korrelation der Variation der Knochendichte mit dem Alter in der Altersgruppe  $\geq 20$  Jahre ist allerdings zu gering, um daraus eine Altersbestimmungsmethode ableiten zu können. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass eine automatische Dicken- und Dichtenmessung von Schädelkalotten nicht für die Erstellung einer geschlechtsspezifischen Altersbestimmungsmethode in der Rechtsmedizin geeignet sind.

In der vorliegenden Studie wurde die Verteilung der verschiedenen Knochendicken innerhalb jeweils einer Kalottenhälften in Histogrammen dargestellt. Hier wurde die Häufigkeit des Auftretens eines Schädel-Dicke-Werts gegen die Schädelstärke für jede Schädelhälfte einzeln aufgetragen. Bei der Betrachtung dieser Histogramme fiel ein besonders komplexes und individuelles Verteilungsmuster bei den Erwachsenen Schädeln auf. So ist durch die Histogramme jeder Schädelhälfte ihre „Signatur“ zuzuordnen. Mithilfe dieser Ergebnisse soll in Zukunft die Möglichkeit eines biometrischen Verfahrens zur Identifizierung von Unbekannten durch die „Signatur des Schädels“ evaluiert werden.



## 6. Summary

Radiological imaging represents an increasingly important methodology of many different investigations in forensic medicine. The present study evaluates an automatic image analysis method of CT-scans of skullcaps for gender-specific age determination. The aim of this study was to investigate a potentially new aging methodology for forensic medicine.

The study included 344 skullcaps of 120 European women and 224 European men, which were provided by the Department of Forensic Medicine of the Justus-Liebig-University Gießen. Ages of the examined skullcaps ranged between three months and 100 years. To collect the data the radiological scans of the calottes were performed with the high-resolution Computer Tomograph eXplore Locus Ultra (eLU) in the Department of Neuroradiology of the University Hospital Gießen. The scans were processed with the image analysis platform, "Advantage Workstation", version 4.1. They were also evaluated by a program in the computer language IDL, which was developed for this study.

The thickness and Hounsfield unit related "radiological density" of the skullcaps was investigated for both genders, that were separated into two groups according to age. The first group included calottes younger than 20 years and the second group included calottes skulls of the ages 20 years and older. The frontal and occipital parts of the calottes were evaluated separately. For the younger group a positive correlation was found between thickness and age as well as density and age. Due to a small sample size of calottes in this age group, a reasonable approach to age determination could not be assessed. For the older age group ( $\geq 20$  years), no correlation could be found between thickness and age. Yet for the female skullcaps the correlation between density and age was more negative than in male calottes. Another gender dependent difference was found in the variation of the density within the adult skull. It was found that the density variability decreases as function of age for female skulls and that it remains constant for male skulls. The density and the variation of the density were calculated from the mean measured Hounsfield units at different measuring positions of the skull. The correlations between density versus age or the variation of density versus age in the group  $\geq 20$  years were too low to enable an applicable age determination. Altogether, the results point out that the thickness and density measurement of skullcaps, investigated with the

used computer program, is not suited for gender-specific age determination in forensic medicine.

In this study, the bone thickness distribution of the different subject's skullcaps were investigated by the aid of histogram plots of the frequency of an occurrence of a skull-thickness value against the skull-thickness. What attracted special attention was the finding of highly complex distribution patterns, which showed distinct potentially individual differences in the group of adult skulls. On the basis of this eventually indeed individual "signature of the skull" the setup of a new biometric identification method for unknown subjects will be evaluated in future studies.

## 7. Abkürzungsverzeichnis

( )	Bezug auf das Literaturverzeichnis
3D	dreidimensional
AW	Advantage Workstation
CsI	Cäsiumiodid-Nadeln
CT	Computertomograph
eLU	eXplore Locus Ultra
et al.	et alii (und andere)
ff.	Folgende
GB	Gigabyte
GE	General Electric
GHz	Gigahertz
HE	Hounsfield-Einheiten
IDL	Interactive Data Language
kVp	peak kilovoltage, Spitzenspannung
mA	Milliampere
med.	Medizinisch
mm	Milimeter
mm <sup>3</sup>	Kubikmilimeter
OPTG	Orthopantomographie
PC	Personal Computer
<i>r</i>	Korrelationskoeffizient
RAM	random-access memory
S.	Seite

## 8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Knochen des Schädels von der Seite (Benninghoff, Drenckhahn Anatomie, Band 1, 17. Auflage 2008 © Elsevier GmbH, Urban & Fischer, München), mit freundlicher Genehmigung des Verlags: Elsevier GmbH, Urban & Fischer, München.....	8
Abbildung 2: Innenansicht der Knochen des Schädeldachs (Benninghoff, Drenckhahn Anatomie, Band 1, 17. Auflage 2008 © Elsevier GmbH, Urban & Fischer, München), mit freundlicher Genehmigung des Verlags: Elsevier GmbH, Urban & Fischer, München.....	10
Abbildung 3: Der Tomograph eXplore Locus Ultra – eLU .....	19
Abbildung 4: Einlesen einer Schädelkalotte im eLU .....	21
Abbildung 5: Übersicht einer frontalen Kalottenhälfte an der AW .....	23
Abbildung 6: Rohdatenschnittbild .....	25
Abbildung 7: Kalottenschnittbild nach einer Trennwert-Segmentierung .....	26
Abbildung 8: HE Histogramm in y-Richtung .....	27
Abbildung 9: Erste Ableitung der Histogramm-Kurve aus Abbildung 8.....	27
Abbildung 10: HE Histogramm in x-Richtung .....	28
Abbildung 11: Erste Ableitung der Histogramm-Kurve aus Abbildung 10.....	28
Abbildung 12: Festlegung der Orientierungspunkte für charakteristische Kalottenpositionen .....	29
Abbildung 13: Bestimmung der Dicke und der Knochendichte .....	29
Abbildung 14: HE Histogramm entlang der in Abbildung 13 gezeigten Linie .....	30
Abbildung 15: Erste Ableitung der Histogramm-Kurve aus Abbildung 14.....	31
Abbildung 16: Darstellung vieler Liniensegmente, die vom Kalotttenzentrum m entlang eines Halbkreises geschlagen werden. ....	32
Abbildung 17: Altersverteilung der weiblichen Kalotten (An erster Stelle der Beschriftungen der Altersgruppen steht die betreffende Altersspanne in Jahren und an zweiter Stelle, fett gedruckt, die Anzahl der vorhandenen Kalotten in der jeweiligen Gruppe).....	37
Abbildung 18: Altersverteilung der männlichen Kalotten (An erster Stelle der Beschriftungen der Altersgruppen steht die betreffende Altersspanne in Jahren und an zweiter Stelle, fett gedruckt, die Anzahl der vorhandenen Kalotten der jeweiligen Gruppe).....	38
Abbildung 19: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften .....	39
Abbildung 20: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	40
Abbildung 21: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften .....	40

Abbildung 22: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	41
Abbildung 23: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften .....	42
Abbildung 24: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	42
Abbildung 25: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften .....	43
Abbildung 26: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	43
Abbildung 27: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften .....	44
Abbildung 28: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	45
Abbildung 29: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften .....	45
Abbildung 30: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	46
Abbildung 31: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften .....	47
Abbildung 32: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	47
Abbildung 33: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften .....	48
Abbildung 34: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Kalottendicke“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	48
Abbildung 35: Korrelationsdiagramm der Funktion „relative (prozentuale) Standardabweichung“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für alle Altersbereiche, frontale Kalottenhälften .....	49

Abbildung 36: Korrelationsdiagramm der Funktion „relative (prozentuale) Standardabweichung“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für alle Altersbereiche, okzipitale Kalottenhälften .....	50
Abbildung 37: Korrelationsdiagramm der Funktion „relative (prozentuale) Standardabweichung“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für alle Altersbereiche, frontale Kalottenhälften .....	50
Abbildung 38: Korrelationsdiagramm der Funktion „relative (prozentuale) Standardabweichung“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für alle Altersbereiche, okzipitale Kalottenhälften .....	51
Abbildung 39: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften .....	52
Abbildung 40: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	52
Abbildung 41: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften .....	53
Abbildung 42: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	53
Abbildung 43: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften .....	54
Abbildung 44: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	55
Abbildung 45: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften .....	55
Abbildung 46: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	56
Abbildung 47: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften .....	57
Abbildung 48: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	57
Abbildung 49: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften .....	58

Abbildung 50: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften.....	58
Abbildung 51: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften.....	59
Abbildung 52: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften.....	59
Abbildung 53: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften.....	60
Abbildung 54: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Gesamtsumme HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften.....	60
Abbildung 55: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften.....	61
Abbildung 56: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	62
Abbildung 57: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften.....	62
Abbildung 58: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	63
Abbildung 59: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften.....	64
Abbildung 60: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	64
Abbildung 61: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften.....	65
Abbildung 62: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	65
Abbildung 63: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften.....	66

Abbildung 64: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften.....	67
Abbildung 65: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe ≥20 Jahre, frontale Kalottenhälften.....	67
Abbildung 66: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe ≥20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften.....	68
Abbildung 67: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften.....	69
Abbildung 68: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften.....	69
Abbildung 69: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe ≥20 Jahre, frontale Kalottenhälften.....	70
Abbildung 70: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung des Mittelwertes HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe ≥20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften.....	70
Abbildung 71: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften.....	71
Abbildung 72: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften.....	72
Abbildung 73: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe ≥20 Jahre, frontale Kalottenhälften.....	72
Abbildung 74: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe ≥20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften.....	73
Abbildung 75: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, frontale Kalottenhälften.....	74
Abbildung 76: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälften.....	74
Abbildung 77: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe ≥20 Jahre, frontale Kalottenhälften.....	75



Abbildung 78: Korrelationsdiagramm der Funktion „Mittelwert der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	75
Abbildung 79: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften .....	76
Abbildung 80: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	77
Abbildung 81: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften .....	77
Abbildung 82: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der weiblichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	78
Abbildung 83: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften .....	79
Abbildung 84: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $< 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	79
Abbildung 85: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälften .....	80
Abbildung 86: Korrelationsdiagramm der Funktion „Standardabweichung der Standardabweichung der HE“ versus „Alter“ der männlichen Schädelkalotten für die Altersgruppe $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälften .....	80
Abbildung 87: Dickenverteilung, weiblich, $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 1 .....	84
Abbildung 88: Dickenverteilung, weiblich, $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 2 .....	84
Abbildung 89: Dickenverteilung, weiblich, $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 3 .....	84
Abbildung 90: Dickenverteilung, weiblich, $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 4 .....	84
Abbildung 91: Dickenverteilung, weiblich, $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 5 .....	84
Abbildung 92: Dickenverteilung, weiblich, $< 20$ Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 6 .....	84
Abbildung 93: Dickenverteilung, weiblich, $< 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 1 .....	85
Abbildung 94: Dickenverteilung, weiblich, $< 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 2 .....	85

Abbildung 95: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 3 .....	85
Abbildung 96: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 4 .....	85
Abbildung 97: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 5 .....	85
Abbildung 98: Dickenverteilung, weiblich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 6 .....	85
Abbildung 99: Dickenverteilung, weiblich, $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 1 .....	86
Abbildung 100: Dickenverteilung, weiblich, $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 2 .....	86
Abbildung 101: Dickenverteilung, weiblich, $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 3 .....	86
Abbildung 102: Dickenverteilung, weiblich, $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 4 .....	86
Abbildung 103: Dickenverteilung, weiblich, $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 5 .....	86
Abbildung 104: Dickenverteilung, weiblich, $\geq 20$ Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 6 .....	86
Abbildung 105: Dickenverteilung, weiblich, $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 1 .....	87
Abbildung 106: Dickenverteilung, weiblich, $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 2 .....	87
Abbildung 107: Dickenverteilung, weiblich, $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 3 .....	87
Abbildung 108: Dickenverteilung, weiblich, $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 4 .....	87
Abbildung 109: Dickenverteilung, weiblich, $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 5 .....	87
Abbildung 110: Dickenverteilung, weiblich, $\geq 20$ Jahre, okzipitale Kalottenhälfte, Beispiel 6 .....	87
Abbildung 111: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 1 .....	88
Abbildung 112: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 2 .....	88
Abbildung 113: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 3 .....	88
Abbildung 114: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 4 .....	88
Abbildung 115: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 5 .....	88
Abbildung 116: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, frontale Kalottenhälfte, Beispiel 6 .....	88

Abbildung 117: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte,	
Beispiel 1 .....	89
Abbildung 118: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte,	
Beispiel 2 .....	89
Abbildung 119: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte,	
Beispiel 3 .....	89
Abbildung 120: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte,	
Beispiel 4 .....	89
Abbildung 121: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte,	
Beispiel 5 .....	89
Abbildung 122: Dickenverteilung, männlich, <20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte,	
Beispiel 6 .....	89
Abbildung 123: Dickenverteilung, männlich, ≥20 Jahre, frontale Kalottenhälfte,	
Beispiel 1 .....	90
Abbildung 124: Dickenverteilung, männlich, ≥20 Jahre, frontale Kalottenhälfte,	
Beispiel 2 .....	90
Abbildung 125: Dickenverteilung, männlich, ≥20 Jahre, frontale Kalottenhälfte,	
Beispiel 3 .....	90
Abbildung 126: Dickenverteilung, männlich, ≥20 Jahre, frontale Kalottenhälfte,	
Beispiel 4 .....	90
Abbildung 127: Dickenverteilung, männlich, ≥20 Jahre, frontale Kalottenhälfte,	
Beispiel 5 .....	90
Abbildung 128: Dickenverteilung, männlich, ≥20 Jahre, frontale Kalottenhälfte,	
Beispiel 6 .....	90
Abbildung 129: Dickenverteilung, männlich, ≥20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte,	
Beispiel 1 .....	91
Abbildung 130: Dickenverteilung, männlich, ≥20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte,	
Beispiel 2 .....	91
Abbildung 131: Dickenverteilung, männlich, ≥20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte,	
Beispiel 3 .....	91
Abbildung 132: Dickenverteilung, männlich, ≥20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte,	
Beispiel 4 .....	91
Abbildung 133: Dickenverteilung, männlich, ≥20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte,	
Beispiel 5 .....	91
Abbildung 134: Dickenverteilung, männlich, ≥20 Jahre, okzipitale Kalottenhälfte,	
Beispiel 6 .....	91

## 9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Altersspannen des vollständigen Verschlusses der Epiphysenfugen in Jahren, nach Geschlechtern getrennt, ansatzweise chronologisch geordnet (nach Dettmeyer et al. 2011), mit freundlicher Genehmigung des Verlags: Springer, Heidelberg.....	3
Tabelle 2: Geschlechtsdifferenten Merkmale am Schädel, sortiert nach Gewichtung. Die Beurteilungsergebnisse bezüglich der Merkmale eines Schädels sind beispielhaft in Spalte „b“ eingetragen (nach Schiwy-Bochat 2001), mit freundlicher Genehmigung des Verlags: Schmidt-Römhild, Lübeck.....	6
Tabelle 3: Ergebnisse der Korrelationsuntersuchung für die weiblichen und männlichen Schädelkalotten .....	82

## 10.Literaturverzeichnis

(Bass 1995) Bass, W. M. (1995): *Human osteology. A laboratory and field manual*. 4. Aufl., Missouri Archaeological Society, Columbia, S. 1 ff.

(Beichelt 2003) Beichelt, F. (2003): *Teubner-Taschenbuch der Stochastik. Wahrscheinlichkeitstheorie, stochastische Prozesse, mathematische Statistik*. 1. Aufl., Teubner, Stuttgart , Leipzig , Wiesbaden.

(Benninghoff und Drenckhahn 2008) Benninghoff, A.; Drenckhahn, D. (2008): *Anatomie. Makroskopische Anatomie, Embryologie und Histologie des Menschen*. 17. Aufl., Urban & Schwarzenberg, München [u.a.], S. 482 ff., 614.

(Dettmeyer et al. 2011) Dettmeyer, R.; Verhoff, M. A.; Schütz, H. (2011): *Rechtsmedizin*. Springer, Heidelberg, S. 231 ff.

(Eska 2013) Eska, S. J. (2013): *Optimierungsversuch von Alters- und Geschlechtszuordnungen in der Forensik: Untersuchung verschiedener Korrelationen von Kalottendicken und ihrer Streuung bestimmt an hochaufgelösten Volumen-Computer-Tomographie Bildern*. Med. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen.

(Fleckenstein et al. 2004) Fleckenstein, P.; Trantum-Jensen, J.; Firbas, W. (2004): *Röntgenanatomie. Normalbefunde in Röntgen, CT, MRT, Ultraschall und Szintigraphie*. 1. Aufl., Elsevier, Urban und Fischer, München.

(Galonska 2001) Galonska, P. (2001): *Röntgonologische Altersschätzung Einführung und Übersicht*. In: M. Oehmichen und G. Geserick (Hg.): *Osteologische Identifikation und Altersschätzung. Osteologic identification and estimation of age*. Schmidt-Römhild, Lübeck, S. 293–306.

(Gerstenberger 2002) Gerstenberger, J. (2002): *Analyse alter DNA zur Ermittlung von Heiratsmustern in einer frühmittelalterlichen Bevölkerung*. Med. Dissertation. Georg-August-Universität zu Göttingen, S. 41.

(Geserick und Schmeling 2001) Geserick, G.; Schmeling, A. (2001): *Übersicht zum gegenwärtigen Stand der Altersschätzung Lebender im deutsch-sprachigen Raum*. In: M. Oehmichen und G. Geserick (Hg.): *Osteologische Identifikation und Altersschätzung. Osteologic identification and estimation of age*. Schmidt-Römhild, Lübeck, S. 255–261.

(Graw 2001) Graw, M. (2001): *Moprhometrische und morphognostische Geschlechtsdiagnostik an der menschlichen Schädelbais*. In: M. Oehmichen und G. Geserick (Hg.): Osteologische Identifikation und Altersschätzung. Osteologic identification and estimation of age. Schmidt-Römhild, Lübeck, S. 103–121.

(Harth 2011) Harth, S. (2011): *Beurteilung der Verknöcherung der Schädelnähte und der Knochendichte der Kalotte zur Altersschätzung nach Darstellung im Flat-Panel Volumen-Computertomogramm*. Med. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen.

(Harth et al. 2009a) Harth, S.; Obert, M.; Ramsthaler, F.; Reuß, C.; Traupe, H.; Verhoff, M.A (2009): *Dokumentation der Schädelnahtossifikation*. In: Rechtsmedizin 19 (3), S. 171–174.

(Harth et al. 2009b) Harth, S.; Obert, M.; Ramsthaler, F.; Reuß, C.; Traupe, H.; Verhoff, M. A. (2009): *Estimating age by assessing the ossification degree of cranial sutures with the aid of Flat-Panel-CT*. In: Legal Medicine 11, S. S186.

(Harth et al. 2010) Harth, Sebastian; Obert, Martin; Ramsthaler, Frank; Reuß, Christina; Traupe, Horst; Verhoff, Marcel A. (2010): *Ossification Degrees of Cranial Sutures Determined with Flat-Panel Computed Tomography: Narrowing the Age Estimate with Extrema*. In: Journal of Forensic Sciences 55 (3), S. 690–694.

(Herrmann 1990) Herrmann, B. (1990): *Prähistorische Anthropologie. Leitfaden der Feld- und Labormethoden*. Springer-Verlag, Berlin, New York, S. 52 ff.

(Höhler 2008) Höhler, T. (2008): *Metrische Genauigkeit der flat panel volumetric computed tomography und verschiedener Orthopantomographien in der präimplantologischen Diagnostik*. Med. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen.

(Kaatsch 2001) Kaatsch, H.-J (2001): *Juristische Aspekte der Altersbestimmung*. In: M. Oehmichen und G. Geserick (Hg.): Osteologische Identifikation und Altersschätzung. Osteologic identification and estimation of age. Schmidt-Römhild, Lübeck, S. 243–254.

(Knapp 2008) Knapp, S. (2008): *Bestimmung von Hirngefäßstenose-Graden in der Volumen-CT anhand eines Stenose-Modells*. Med. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen.

(Knußmann 1988) *Anthropologie. Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen*. Unter Mitarbeit von Ilse Schwidetzky, Hans W. Jürgens und Gerfried Ziegelmayr. 4. Aufl. Fischer, Stuttgart [u.a.].

(Kreutz und Verhoff 2002) Kreutz, K.; Verhoff, M. A. (2002): *Forensische Anthropologie. Einführung in die forensische Anthropologie unter besonderer Berücksichtigung ausgewählter Fragestellungen der forensischen Medizin mit praktischen Übungen*. LOB.de, Lehmanns Media, Berlin, S. 1 ff.

(Leopold 1998) Leopold, D. (1998): *Identifikation unbekannter Toter. Interdisziplinäre Methodik, forensische Osteologie ; mit Tabellen*. Schmidt-Römhild, Lübeck, S. 198-220.

(Lippert 2000) Lippert, H. (2000): *Lehrbuch Anatomie*. 184 Tabellen. 5. Aufl. Urban & Fischer, München [u.a.], S. 449 ff.

(Madea 2003) Madea, B. (2003): *Praxis Rechtsmedizin. Befunderhebung, Rekonstruktion, Begutachtung ; mit 172 Tabellen*. Springer, Berlin [u.a.], S. 73-75, 287-293.

(Meyer et al. 2000) Meyer, E.; Wiese, M.; Bruchhaus, H.; Claussen, M.; Klein, A. (2000): *Extraction and amplification of authentic DNA from ancient human remains. Selected papers from the 4th International Symposium Advances in*. In: Forensic Science International 113 (1–3), S. 87–90. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379073800002206>, zuletzt geprüft am 05.10.2012.

(Moll und Moll 2000) Moll, K.-J; Moll, M. (2000): *Anatomie. Kurzlehrbuch zum Gegenstandskatalog*. 16. Aufl. Urban und Fischer, München; Jena, S. 269 ff.

(Obert 2011) Obert, M.: *Der Volumen-Computertomograph – VCT*. Online verfügbar unter [http://www.ukgm.de/ugm\\_2/deu/ugi\\_nrd/4302.html](http://www.ukgm.de/ugm_2/deu/ugi_nrd/4302.html), zuletzt geprüft am 05.10.2012.

(Obert 2011) Obert, M. (2011): *Hintergrundinformationen zur „Gießener Schädel-sammlung“*. Gießen, 11.10.2011. persönliche Mitteilung an F. Schumacher.

(Obert et al. 2012) Obert, M.; Grams, A.; Seyfried, M.; Schumacher, F.; Verhoff, M. A.; Gizewski, E. R. (2012): *Charakterisierung von geschlechtsspezifischen Strukturunterschieden in der menschlichen Kalotte zur Altersschätzung mit hochauflösendem Flat-Panel CT und fraktaler Geometrie*. In: Fortschr Röntgenstr 184 S. 1.

(Obert et al. 2010) Obert, M.; Schulte-Geers, C.; Schilling, R. L.; Harth, S.; Kläver, M.; Traupe, H. et al. (2010): *High-resolution flat-panel volumetric CT images show no cor-*

*relation between human age and sagittal suture obliteration—Independent of sex.* In: Forensic Science International 200 (1-3), S. 180.e1.

(Platzer et al. 2003) Platzer, W.; Fritsch, H.; Kühnel, W.; Kahle, W.; Frotscher, M. (2003): *Taschenatlas Anatomie*. In 3 Bänden. 8. Aufl. Thieme Verlag, Stuttgart, S. 282 ff.

(Pschyrembel und Bach 2010) Pschyrembel, W.; Bach, M. (2010): *Pschyrembel Klinisches Wörterbuch 2011*. 262. Aufl. De Gruyter, Berlin [u.a.], S. 1503-1504.

(Putz und Pabst 2006) Putz, R.; Pabst, R. (2006): *Atlas der Anatomie des Menschen*. 22. Aufl. Urban & Schwarzenberg, München [u.a.].

(Rämisch und Herrmann 1963) Rämisch, R.; Herrmann, W. R. (1963): *Ergebnisse der Schädelkalottendicke bei Männern und Frauen*. In: Ergebnisse der Schädelkalottendicke bei Männern und Frauen (54), S. 227–230.

(Ritz-Timme 1999) Ritz-Timme, S. (1999): *Lebensaltersbestimmung aufgrund des Razemisierungsgrades von Asparaginsäure. Grundlagen, Methodik, Möglichkeiten, Grenzen, Anwendungsbereiche*. Schmidt-Römhild, Lübeck, S. 7-8, 65.

(Ritz-Timme 2001) Ritz-Timme, S. (2001): *Lebensalterbestimmung aufgrund der Razemisierung von Asparaginsäure: Grundlagen, Methodik, Möglichkeiten und Grenzen*. In: M. Oehmichen und G. Geserick (Hg.): Osteologische Identifikation und Altersschätzung. Osteologic identification and estimation of age. Schmidt-Römhild, Lübeck, S. 277–292.

(Rösing et al. 2005) Rösing, F. W.; Graw, M.; Marré, B.; Ritz-Timme, S.; Rothschild, M. A.; Röttscher, K. et al. (2005): *Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin*. In: Rechtsmedizin 15 (1), S. 32–38.

(Saternus et al. 2001) Saternus, K.-S.; Salamat, B.; Kernbach-Wighton, G. (2001): *Höhen-Breiten-Index der Symphyse als Altersparameter*. In: M. Oehmichen und G. Geserick (Hg.): Osteologische Identifikation und Altersschätzung. Osteologic identification and estimation of age. Schmidt-Römhild, Lübeck, S. 123–137.

(Schiwy-Bochat 2001) Schiwy-Bochat, K.-H (2001): *Morphognostische Geschlechtsbestimmung am menschlichen Schädel*. In: M. Oehmichen und G. Geserick (Hg.): Osteologische Identifikation und Altersschätzung. Osteologic identification and estimation of age. Schmidt-Römhild, Lübeck, S. 87–102.



(Schroeder 2010) Schroeder, L. (2010): *Geschlechtsdiskriminierung und Körperhöhenbestimmung anhand intrakranieller Parameter am menschlichen Schädel – Untersuchungen im Rahmen des Projektes „Digitale Forensische Osteologie“*. Med. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen.

(Schulte-Geers 2011) Schulte-Geers, C. (2011): *Automatische Analyse von hochauflösender Flat-Panel-Computertomographie-Bildern zur Altersbestimmung beim Menschen*. Med. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen.

(Schulte-Geers et al. 2011) Schulte-Geers, C.; Obert, M.; Schilling, R. L.; Harth, S.; Traupe, H.; Gizewski, E. R.; Verhoff, M. A. (2011): *Age and gender-dependent bone density changes of the human skull disclosed by high-resolution flat-panel computed tomography*. In: Int J Legal Med 125 (3), S. 417–425.

(SciStatCalc 2014) <http://scistatcalc.blogspot.co.uk/2013/10/shapiro-wilk-test-calculator.html>, zuletzt geprüft am 08.07.2014.

(Sjøvold 1988) Sjøvold, T. (1988): Geschlechtsdiagnose am Skelett. In: R. Knußmann (Hg.): *Anthropologie. Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen*. Unter Mitarbeit von Ilse Schwidetzky, Hans W. Jürgens und Gerfried Ziegelmayer. 4. Aufl. Fischer, Stuttgart [u.a.], S. 444–480.

(Summers et al. 2011) Summers, Ronald M.; Baecher, Nicolai; Yao, Jianhua; Liu, Jiamin; Pickhardt, Perry J.; Choi, J. Richard; Hill, Suvimol (2011): *Feasibility of Simultaneous Computed Tomographic Colonography and Fully Automated Bone Mineral Densitometry in a Single Examination*. In: Journal of Computer Assisted Tomography 35 (2), S. 212–216.

(Verhoff 2008) Verhoff, M. A. (2008): *Forensische Osteologie. Problematische Fragestellungen*. Lehmanns Media, Berlin, S. 16-19.

(Verhoff und Kreutz 2005) Verhoff, M. A.; Kreutz, K. (2005): *Forensische Osteologie*. In: Giessener Universitätsblätter (38), S. 43–53.

(Verhoff et al. 2008) Verhoff, M.A; Obert, M.; Harth, S.; Reuß, C.; Karger, B.; Lazaro-va, B. et al. (2008): *„Flat-Panel“-Computertomographie in der Rechtsmedizin*. In: Rechtsmedizin 18 (4), S. 242–246.

(Weiß 2010) Weiß, C. (2010): *Basiswissen Medizinische Statistik*. Springer, Berlin, Heidelberg.

## 11. Publikationsverzeichnis

Obert M.; Grams, A.; Seyfried, M.; Schumacher, F.; Verhoff, M. A.; Gizewski, E.R. (2012): *Charakterisierung von geschlechtsspezifischen Strukturunterschieden in der menschlichen Kalotte zur Altersschätzung mit hochauflösendem Flat-Panel-CT und fraktaler Geometrie*. RöFo 184, Thieme Verlag, Stuttgart, S.195 ff.

Obert, M.; Seyfried, M.; Schumacher, F.; Krombach, G. A. ; Verhoff M. A. (2014). *Aging adult skull vaults by applying the concept of fractal geometry to high-resolution computed tomography images*. Forensic Science International 242, S. 24-13.

Obert, M.; Schumacher, F.; Eska, S.; Seyfried, M.; Walter, A.; Krombach, G. A.; Verhoff, M. A. (2015) *Altersbestimmung menschlicher Kalotten*. Rechtsmedizin 2015/2, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, S. 120-129

## 12.Ehrenwörtliche Erklärung

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nichtveröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten sowie ethische, datenschutzrechtliche und tierschutzrechtliche Grundsätze befolgt. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, oder habe diese nachstehend spezifiziert. Die vorgelegte Arbeit wurde weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt und indirekt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Mit der Überprüfung meiner Arbeit durch eine Plagiatserkennungssoftware bzw. ein internetbasiertes Softwareprogramm erkläre ich mich einverstanden.“

Köln, 22. 06. 2016

Ort, Datum

---

Unterschrift

### **13. Danksagung**

An erster Stelle möchte ich Frau Universitätsprofessorin Dr. med. Gabriele A. Krombach, Direktorin der Klinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie des Universitätsklinikums Gießen, für die Betreuung und die Vertretung dieser Arbeit gegenüber dem Fachbereich Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen herzlich danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. rer. nat. Martin Obert für die hingebungsvolle Betreuung dieser Arbeit. Seit der herzlichen Aufnahme in seine Arbeitsgruppe stand er mir mit seiner unersetzlichen fachlichen und menschlichen Unterstützung jeder Zeit zur Seite. Die Arbeit mit Herrn Obert zeigte mir die großen Chancen von respektvoller und freundschaftlicher Zusammenarbeit auf, welche ich so auf dieser Ebene noch nicht erlebt habe.

Herrn Universitätsprofessor Dr. med. Marcel Verhoff vom Institut für Rechtsmedizin der Justus-Liebig Universität Gießen danke ich sehr für die Genehmigung zur Auswertung der Schädelkalotten.

Für die Bereitstellung von Bildern und Tabellen möchte ich den Verlagen Elsevier GmbH, Urban & Fischer, München; Springer, Heidelberg und Schmidt-Römhild, Lübeck danken.

Mein herzlichster Dank gilt meinen Eltern, welche mir das Studium ermöglichten und mir bedingungslos in allen Bereich des Lebens zur Seite stehen.